

Arduino y los ensayos no destructivos

Trabajo Final de Grado



Facultat de Nàutica de Barcelona
Universitat Politècnica de Catalunya

Trabajo realizado por:

Victor Abad Gibert

Dirigido por:

Juan Antonio Moreno Martínez

Doble titulación de Grado en Tecnologías Marinas e Ingeniería en
Sistemas y Tecnología Naval

Barcelona, 10 de julio del 2018

Agradecimientos

La implementación de este proyecto no hubiera sido posible sin la colaboración de algunas personas.

En primer lugar quiero agradecer al tutor del proyecto, el Dr. Juan Antonio Moreno Martínez, por haber aceptado ser mentor de este proyecto y por el asesoramiento y orientación proporcionados a lo largo del proyecto.

En segundo lugar, quiero expresar mi gratitud al profesor Ander García Bretones, con quien realicé un curso de LabVIEW en la UPC y me ayudó a resolver mis dudas a lo largo del proyecto.

Finalmente, quiero agradecer a mi familia para alentarme a comenzar este proyecto con entusiasmo, y por apoyarme en todas las decisiones tomadas.

Resumen

El presente proyecto se centra en mostrar algunos de los ensayos no destructivos bajo la óptica del ecosistema Arduino mediante los lenguajes de programación gráfico de LabVIEW, de Java y también el de Arduino. Para ello se han utilizado los sensores adecuados que permiten representar los principios físicos de los ensayos que se pretenden mostrar. Estos ensayos son: el ensayo por ultrasonidos, realizando un dispositivo que emite ultrasonidos para determinar la sección de un material, el ensayo por partículas magnéticas, desarrollando una sonda hall utilizada para medir el campo magnético presente en un ensayo por partículas magnéticas, el ensayo por termografía, elaborando una cámara termográfica y la evaluación del ensayo por líquidos penetrantes, desarrollando un programa para hacer una evaluación de los resultados automática.

Abstract

This project is focused on presenting some of the non-destructive testing under the optics of Arduino environment through the LabVIEW, Java and Arduino programming languages. For this purpose, suitable sensors have been selected for representing the physical principles that the aforementioned testing are based on. These testing are: ultrasound testing, through a system that emits ultrasounds in order to determine the section of a material; magnetic particle testing, through the development of a Hall probe used to measure the magnetic field in a magnetic particle testing; thermographic testing, through a thermographic camera; and the evaluation through penetrant liquids, through the development of a program to perform an automatic evaluation of the results.

Tabla de contenido

Agradecimientos	iii
Resumen	iv
Abstract	v
Listado de ilustraciones	viii
Listado de ecuaciones.....	x
Listado de tablas.....	xi
1. Introducción	1
1.1. Motivación	1
1.2. Objetivos.....	1
1.3. Metodología y estructura.....	2
2. Antecedentes	3
2.1. Ensayos No Destructivos (END's)	3
2.2. Arduino	4
2.3. LabVIEW	4
2.4. Java.....	4
3. Requisitos de reglamentación y aspectos legales	5
4. Ensayo por ultrasonidos.....	9
4.1. Introducción	9
4.2. Principios físicos	9
4.3. Ventajas y limitaciones	11
4.2.4. Aplicaciones.....	12
4.5. Hardware	12
4.6. Software.....	15
4.7. Resultados.....	19
5. Ensayo por partículas magnéticas (Sonda Hall)	20
5.1. Introducción	20
5.2. Ensayo por partículas magnéticas.....	21
5.3. Principios físicos	23
5.4. Ventajas y limitaciones	25
5.5. Generación de campos magnéticos	26
5.6. Sonda Hall	26
5.7. Aplicaciones	27
5.8. Hardware	28
5.9. Software.....	30
5.10. Resultados.....	32
6. Ensayo por termografía.....	33
6.1. Introducción	33
6.2. Principios físicos	33
6.3. Ventajas y limitaciones	34
6.4. Aplicaciones	35
6.5. Hardware	35
6.6. Software.....	38
6.7. Resultados.....	40

7. Evaluación de líquidos penetrantes	42
7.1. Introducción	42
7.2. Ensayo por líquidos penetrantes	43
7.3. Principios físicos	46
7.4. Ventajas y limitaciones	48
7.5. Aplicaciones	49
7.5. Hardware	49
7.6. Software.....	50
7.7. Resultados.....	51
8. Presupuesto.....	54
8.1. Ultrasonidos	54
8.2. Sonda Hall	55
8.3. Cámara termográfica	56
8.4. Evaluación líquidos penetrantes.....	57
8.5. Presupuesto total	57
9. Discusión y conclusiones	58
11. Bibliografía y referencias.....	60

Listado de ilustraciones

Ilustración 1 - Características del sonido	9
Ilustración 2 - Espectro acústico [7]	10
Ilustración 3 - Distancia ultrasonidos [10].....	14
Ilustración 4 - Dispositivo de ultrasonidos	14
Ilustración 5 - Diagrama de flujo del sistema de ultrasonidos	15
Ilustración 6 - Definición de puertos COM	15
Ilustración 7 - Selección de pines	16
Ilustración 8 - Configuración del asistente de firmware de LINUX	16
Ilustración 9 - Error de carga de LINUX	16
Ilustración 10 - Calibración de los sensores	17
Ilustración 11 - Cálculo de la distancia	17
Ilustración 12 - Finalización del ensayo	18
Ilustración 13 - Ensayo por ultrasonidos, muestra.	18
Ilustración 14 - Resultados ensayo ultrasonidos	19
Ilustración 15 - Indicaciones en el ensayo por partículas magnéticas [11]	21
Ilustración 16 - Esquema inspección por partículas magnéticas.....	22
Ilustración 17 - Campo magnético. Fuerzas de dipolo.....	23
Ilustración 18 - Espectro. Partículas magnéticas	24
Ilustración 19 - Representación de las líneas de fuerza del campo magnético [11]	24
Ilustración 20 - Esquema yugo electromagnético Ilustración 21 - Yugo electromagnético ..	26
Ilustración 22 - Sensor Hall [12]	27
Ilustración 23 - Esquema electrónico del sensor Hall [13]	29
Ilustración 24 - Relación entre voltaje de salida y densidad de flujo magnético [13].....	29
Ilustración 25 - Montaje final Sonda Hall	30
Ilustración 26 - Diagrama de flujo de la sonda Hall	30
Ilustración 27 - Selección puerto COM y tiempo de muestreo	31
Ilustración 28 - Sonda Hall adquiriendo datos	31
Ilustración 29 - Sonda Hall con el yugo electromagnético	32
Ilustración 30 - Dispositivo de termografía	37
Ilustración 31 - Diagrama de flujo del sistema de termografía	38
Ilustración 32 - Selección del puerto de la cámara	38
Ilustración 33 - Menú de calibración.....	39
Ilustración 34 - Menú de resolución	39
Ilustración 35 - Tiempo de escaneado	39
Ilustración 36 - Interfaz del programa de termografía.....	40
Ilustración 37 - Resultados termografía	40
Ilustración 38 - Comparación de resultados de la termografía.....	41
Ilustración 39 - Discontinuidad por Líquidos Penetrantes	42
Ilustración 40 - Diagrama de proceso	43
Ilustración 41 - Muestra limpiada y secada	44
Ilustración 42 - Temperatura de la superficie a ensayar	44
Ilustración 43 - Aplicación del líquido penetrante	44
Ilustración 44 - Muestra con el exceso eliminado	45
Ilustración 45 - Muestra con el revelador aplicado	45
Ilustración 46 - Indicación lineal continua.....	45
Ilustración 47 - Indicación redondeada	46
Ilustración 48 - Muestras limpiadas	46
Ilustración 49 - mojabilidad de los líquidos [17]	47
Ilustración 50 - Diagrama de flujo del software de evaluación	50
Ilustración 51 - Interfaz del programa de evaluación	51
Ilustración 52 - Indicación lineal continua 1	51
Ilustración 53 - Indicación lineal continua 1 detectada	52

Ilustración 54 - Indicación lineal 2	52
Ilustración 55 - Indicación lineal 2 detectada	52
Ilustración 56 - Indicación redondeada	53
Ilustración 57 - Indicación redondeada detectada	53

Listado de ecuaciones

Ecuación 1 - Transformación unidades del sonido	13
Ecuación 2 - Distancia que recorre el sonido.....	13
Ecuación 3 - Recta voltaje-flujo magnético	29
Ecuación 4 - Densidad de flujo magnético	29
Ecuación 5 - Ley de radiación de Kirchhoff's	34
Ecuación 6 - Ley de radiación de Kirchhoff's simplificada	34
Ecuación 7 - Poder humectante	47

Listado de tablas

Tabla 1 - Ventajas y limitaciones del ensayo por ultrasonidos [8].....	11
Tabla 2 - Hardware ultrasonidos	13
Tabla 3 - Magnitudes magnéticas	25
Tabla 4 - Ventajas y limitaciones del ensayo por partículas magnéticas	25
Tabla 5 - Ventajas y limitaciones de la termografía infrarroja.....	34
Tabla 6 - Ventajas y limitaciones del ensayo por líquidos penetrantes.....	48
Tabla 7 - Presupuesto hardware ultrasonidos	54
Tabla 8 - Presupuesto software ultrasonidos.....	54
Tabla 9 - Presupuesto hardware sonda hall	55
Tabla 10 - Presupuesto software sonda hall.....	55
Tabla 11 - Presupuesto hardware termografía	56
Tabla 12 - Presupuesto software termografía.....	56
Tabla 13 - Presupuesto hardware evaluación.....	57
Tabla 14 - Presupuesto software evaluación	57
Tabla 15 - Presupuesto total del proyecto	57

1. Introducción

En esta sección están expuestos y detallados la motivación y los objetivos del proyecto. La sección de metodología y estructura incluye los pasos que sigue el proyecto y de la manera en que éste está organizado.

1.1. Motivación

Una máquina es un objeto fabricado y compuesto por un conjunto de piezas ajustas entre sí que se usa para facilitar o realizar un trabajo determinado. Estas piezas están formadas por unos materiales que con el paso del tiempo y con su uso, tienen un deterioro. Para saber en qué estado se encuentran estas piezas y para prevenir su rotura, se utilizan los ensayos no destructivos.

Con el paso del tiempo, las nuevas tecnologías se han ido imponiendo y la electrónica y la programación cada vez tienen un papel más importante en la industria.

A causa de esta realidad, el estudiante se ha sentido motivado para enfocar su proyecto a juntar estos dos mundos y hacer un paralelismo de las máquinas utilizadas para hacer los ensayos no destructivos con unas reproducciones de éstas máquinas, diseñadas y programadas por el estudiante.

1.2. Objetivos

Este proyecto tiene como objetivo desarrollar cuatro prototipos de dispositivos para realizar ensayos no destructivos, creando una interacción fácil y rápida entre el usuario y los dispositivos. Para lograrlo, se requiere hacer una interfaz del programa clara y muy visual que facilite el uso de ésta y tener un hardware que sólo se tenga que conectar para hacerlo funcionar. A continuación, se enumeran los objetivos específicos para lograr el objetivo del proyecto.

A. Definir los principios físicos de los ensayos no destructivos

Es necesario definir los principios físicos de los ensayos no destructivos que se van a representar para saber qué tipo de sensores se necesitan y cómo deben funcionar los dispositivos que se realizarán.

B. Seleccionar los sensores Arduino adecuados para cada ensayo

Los sensores utilizados para cada ensayo deben representar y deben funcionar con los mismos principios físicos que los ensayos no destructivos convencionales. Para ello, se debe hacer una búsqueda y selección de los sensores que se ajusten más a los principios físicos de cada ensayo.

C. Diseñar y montar el hardware específico de cada ensayo

Con los sensores seleccionados, se debe diseñar y montar el hardware de cada uno de los dispositivos con los elementos que se precisen.

D. Diseñar y programar el software de los dispositivos realizados

Una vez realizados los dispositivos, es necesario diseñar y programar los softwares pertinentes de cada uno de los dispositivos para hacer posible la interacción del dispositivo con el usuario.

1.3. Metodología y estructura

La metodología seguida a lo largo del desarrollo del proyecto se divide en dos bloques principales: la investigación bibliográfica sobre cada uno de los ensayos representados y el desarrollo de los dispositivos.

Para empezar, hay una introducción para proporcionar a los lectores una visión general del proyecto, incluida la motivación del estudiante, los objetivos definidos y la metodología seguida.

Después de la introducción, viene un capítulo de antecedentes. Incluye una breve aproximación a los ensayos no destructivos, a Arduino, a Labview y finalmente a Java.

El siguiente capítulo corresponde a los requisitos de regulación, que consiste en exponer la legislación aplicable de cada uno de los ensayos, teniendo en cuenta sus condiciones de operación.

Después de eso, se empieza a definir cada uno de los ensayos representados en el proyecto. En cada ensayo habrá una introducción, una explicación de los principios físicos por los cuales se rigen, las ventajas y limitaciones de cada uno de los ensayos, sus aplicaciones, el diseño y montaje del dispositivo (hardware), la programación y el uso de los programas (software) y finalmente, los resultados obtenidos.

Luego viene un capítulo de presupuestos, dónde se describen todos los recursos económicos utilizados para cada ensayo, y, dentro de cada ensayo, se divide en secciones correspondientes a hardware y software. Al final del capítulo se suman los recursos económicos utilizados en todos los ensayos.

Llegando al final, hay el apartado de discusión y conclusión. La discusión incluye una sección para el grado de cumplimiento de cada objetivo y posibles formas de continuar el proyecto. Por último, se expone una conclusión general.

Finalmente, se mencionan las referencias y se adjuntan los anexos.

2. Antecedentes

2.1. Ensayos No Destructivos (END's)

Desde que las personas se dieron cuenta por primera vez de los fallos de sus máquinas han reconocido la necesidad de inspeccionarlas para evitar estos fallos. Existe una amplia variedad de pruebas, unas destructivas y otras no destructivas. La inspección no destructiva está basada en fenómenos físicos, con el objetivo de obtener información sobre los defectos o estado de un material, sin provocar daños químicos, mecánicos o dimensionales al propio material.

En general, las diversas técnicas de evaluación no destructivas se pueden ubicar en dos categorías: activas y pasivas. Las técnicas activas son aquellas en las que se introduce algo dentro o sobre la muestra y se espera una respuesta si hay un defecto presente. Los ensayos por partículas magnéticas, los ultrasonidos y los líquidos penetrantes entran dentro de esta categoría. Las técnicas pasivas, por otro lado, son aquellas que supervisan u observan el elemento en cuestión durante su funcionamiento o durante un ciclo de prueba e intentan determinar la presencia de un defecto a través de alguna reacción de la muestra. La emisión acústica, el análisis de ruido, la termografía, el examen visual y algunas técnicas magnéticas residuales se encuentran en esta clasificación.

Los efectos beneficiosos de los ensayos no destructivos se pueden encontrar en el diseño de la ingeniería. En el diseño mecánico, por ejemplo, se introduce un factor de seguridad para garantizar un margen de prestaciones de la pieza por encima de las mínimas estipuladas. El ingeniero especificará que el material estará libre de defectos, pero debe haber más seguridad que esa. El uso de una evaluación no destructiva en el control de calidad de las piezas fabricadas puede proporcionar esa seguridad y, por lo tanto, aumentar la certeza de que un artículo funcionará según lo previsto.

Los ensayos no destructivos también pueden ser beneficiosos para reducir la frecuencia de mantenimiento no programado, que generalmente es más costoso que el mantenimiento regular programado. A menudo, los ensayos no destructivos se pueden utilizar para inspeccionar partes cuestionables en el equipo, evitando así un apagado no programado e innecesario si la pieza no tiene defectos. El equipo puede continuar funcionando sin temor a fallas con la garantía de que no hay ningún defecto presente. Además, colaboran a prevenir accidentes y proporcionan beneficios económicos directos (por disminución de los costes de fabricación y aumento de la producción) e indirectos (por su contribución a la mejora de los diseños y el control de los procesos de fabricación). [1]

2.2. Arduino

Arduino es una plataforma electrónica de código abierto basada en un hardware y un software de fácil uso. Las placas Arduino pueden leer entradas (luz en un sensor o un dedo en un botón) y convertirlo en una salida como por ejemplo activar un motor o encender un LED. Se pueden dar órdenes a la placa enviando un conjunto de instrucciones al micro-controlador que ésta lleva incorporada. Para hacerlo, utiliza el lenguaje de programación Arduino, basado en el cableado, y el software Arduino, basado en el procesamiento.

Todas las placas Arduino son de código abierto, lo que permite a los usuarios construirlos de forma independiente y adaptarlos a sus necesidades. El software también es de código abierto y se ejecuta tanto en Mac, Windows y Linux. [2]

Dentro de Arduino hay muchos tipos de placas distintas cómo Arduino Leonardo, Arduino Mega 2560, Arduino Nano, pero para la necesidad de éste proyecto se ha utilizado, para todos los casos, la placa Arduino UNO. Se ha escogido este prototipo porque sus especificaciones cumplen para satisfacer todos los sistemas desarrollados en este proyecto. En el Anexo A se puede ver una comparativa de todas las placas Arduino con sus especificaciones.

2.3. LabVIEW

LabVIEW es una de las herramientas que se han utilizado para diseñar los softwares de los ensayos. Consiste en una programa de ingeniería que está diseñado para aplicaciones que requieren pruebas, medidas y control con acceso rápido a información de datos y hardware. Está basado en una programación gráfica (código G) que es muy útil para poder ver y editar fácilmente todos los aspectos de la aplicación.

Para poder controlar el hardware de Arduino mediante LabVIEW se ha precisado de un toolkit llamado LINX MakerHub, que es un proyecto de fuente abierta que está diseñado para facilitar el desarrollo de aplicaciones en las que su tarea es controlar e interpretar unas señales provenientes de un hardware, sean digitales o analógicas.

En éste proyecto se ha utilizado el software de LabVIEW para realizar el ensayo por ultrasonidos y para la sonda Hall, del ensayo por partículas magnéticas.

2.4. Java

En el ensayo por termografía se ha utilizado un código realizado con lenguaje Java. Java es un lenguaje de programación que deriva de lenguajes como el C y el C++ y funciona con la tecnología WORA “Write Once, Run Anywhere” (escribir una vez, ejecutar en cualquier lugar). Esto se traduce a que el código se compila una vez, y luego puede funcionar en cualquier plataforma. [3]

3. Requisitos de reglamentación y aspectos legales

A continuación se introducen las normas obligatorias aplicables para los ensayos de ultrasonidos, partículas magnéticas, termografía y evaluación. Han sido desarrolladas principalmente por tres organizaciones: ISO, CTN y CEN.

La Organización Internacional de Estandarización (ISO) es una organización no gubernamental con muchos organismos de normalización. Reúne a expertos de diferentes campos para desarrollar normas internacionales de mercado relevantes que garanticen la calidad, seguridad y eficiencia de los productos y servicios. Las normas para los ensayos no destructivos son desarrolladas por el comité técnico TC 135. [4]

El Comité Técnico de Normalización (CTN) de la Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR) ha desarrollado las UNE, que son un conjunto de normas. En este caso, las normas son desarrolladas por el comité de ensayos no destructivos CTN 130. [5]

En base a desarrollar un lenguaje común en el campo internacional de quienes trabajan con los ensayos no destructivos, el Comité Europeo para la Normalización (CEN) a través de su comité técnico TC 138, ha elaborado una serie de normas que contienen todos los términos que se utilizan en la industria.

- **UNE-EN 1330-1:1999. Ensayos no destructivos. Terminología. Parte 1: Lista de términos generales.**
Esta parte de esta norma europea define los términos generales utilizados en ensayos no destructivos que provienen de otros campos.
- **UNE-EN 1330-2:1999. Ensayos no destructivos. Terminología. Parte 2: Términos comunes a los métodos de ensayos no destructivos.**
Esta parte de la norma europea define los términos comunes a dos o más métodos de ensayos no destructivos.

Para el **ensayo de ultrasonidos** las normas aplicadas son las siguientes:

- **UNE-EN 14127:2011. Ensayos no destructivos. Medición del espesor mediante ultrasonidos.**
Esta norma europea especifica los principios de medición de espesor mediante ultrasonidos, de materiales metálicos y no metálicos, únicamente en base a la medición de vuelo de impulsos ultrasónicos.
- **UNE-EN 583-1:1999. Ensayos no destructivos. Examen por ultrasonidos. Parte 1: Principios generales.**
Esta norma europea define los principios generales requeridos para el examen por ultrasonidos de los productos industriales permeables a los ultrasonidos.

- **UNE-EN 583-2:2001. Ensayos no destructivos. Examen por ultrasonidos. Parte 2: Ajuste de la sensibilidad y de la base de tiempos.**

Esta parte de la norma especifica las reglas generales de ajuste de la escala de la base de tiempos y de la sensibilidad (es decir, el ajuste de la ganancia), de un detector de discontinuidades ultrasónico manual, a fin de que puedan ser efectuadas mediciones reproducibles de la localización y de la altura de eco del reflector.

- **UNE-EN 583-3:1997. Ensayos no destructivos. Examen por ultrasonidos. Parte 3: Técnica de transmisión.**

Esta parte de la norma especifica los principios de las técnicas de transmisión. La técnica de transmisión se puede utilizar para la detección de discontinuidades y para la determinación de la atenuación.

- **UNE-EN 583-4:2002. Ensayos no destructivos. Examen por ultrasonidos. Parte 4: Examen de discontinuidades perpendiculares a la superficie.**

Esta norma europea define los principios para la exploración en tándem y LLT¹ para la detección de discontinuidades perpendiculares a la superficie.

- **UNE-EN 1330-4:2010. Ensayos no destructivos. Terminología. Parte 4: Términos utilizados en ensayos por ultrasonidos.**

Esta norma europea define los términos utilizados en ensayos por ultrasonidos.

Las normas aplicadas en el **ensayo por partículas magnéticas** (referentes a la sonda Hall) son:

- **UNE-EN 1330-7:2006. Ensayos no destructivos. Terminología. Parte 7: Términos utilizados en los ensayos por partículas magnéticas.**

Esta norma define los términos utilizados en los ensayos por partículas magnéticas.

- **UNE-EN ISO 9934-1:2002. Ensayos no destructivos. Ensayos por partículas magnéticas. Parte 1: Principios generales. (ISO 9934-1:2001).**

Esta norma europea especifica los principios generales para el ensayo mediante partículas magnéticas de materiales ferromagnéticos. El ensayo por partículas magnéticas se aplica principalmente a la detección de discontinuidades superficiales, en particular a las fisuras. También puede detectar discontinuidades subsuperficiales, pero su sensibilidad disminuye rápidamente con la profundidad.

- **UNE-EN ISO 9934-3:2003. Ensayos no destructivos. Ensayos por partículas magnéticas. Parte 3: Equipo. (ISO 9934-3:2002).**

Esta norma europea describe tres tipos de equipos de ensayo por partículas magnéticas: equipo portátil o transportable, instalaciones fijas, sistema de ensayo especializado para ensayar componentes de forma continua. También se describen los equipos para magnetización, desmagnetización, iluminación, medición y monitorizado.

¹ LLT: onda longitudinal-longitudinal-transversal

En el **ensayo por termografía** las normas utilizadas son:

- **ISO 18434-1:2008. Condición de vigilancia y diagnóstico de máquinas – Termografía- Parte 1: Procedimientos Generales.**
Esta norma internacional define los principios generales requeridos para el examen de termografía de productos industriales.
- **ISO 10878. Ensayos no destructivos. Termografía infrarroja. Vocabulario.**
Esta norma europea define los términos técnicos relativos al ensayo por termografía.
- **ISO 18436-7. Condición de vigilancia y diagnóstico de máquinas – Requisitos de formación y certificación del personal – Parte 8: Termografía.**
Esta parte de la ISO 18436 especifica los requisitos de formación y certificación del personal que realiza la monitorización y el diagnóstico de la condición de la máquina mediante termografía infrarroja.
- **ISO 18436-8. Condición de vigilancia y diagnóstico de máquinas – Requisitos de formación y certificación del personal – Parte 8: Comportamiento térmico.**
Esta parte de la ISO 18436 especifica los requisitos de formación y certificación del personal que realiza diagnósticos sobre el comportamiento térmico de la maquinaria a ensayar.

Las normas utilizadas en la **evaluación de líquidos penetrantes** son las siguientes:

- **UNE-EN ISO 3452-1:2013. Ensayos no destructivos. Ensayo por líquidos penetrantes. Parte 1: Principios generales (ISO 3452-1:2013).**
Esta parte de la norma ISO 3452 especifica un método de ensayo por líquidos penetrantes utilizado para detectar discontinuidades tales como grietas, repliegues, porosidad y falta de fusión, abiertas a la superficie del material a examinar. Se aplica principalmente a materiales metálicos, pero también se puede utilizar con otros materiales a condición de que sean inertes a los productos de ensayo y que no sean excesivamente porosos (piezas de fundición, piezas forjadas, soldaduras, cerámicas, etc.).
- **UNE-EN ISO 3059:2013. Ensayos no destructivos. Ensayo por líquidos penetrantes y partículas magnéticas. Condiciones de observación.**
Esta norma internacional especifica el control de las condiciones de observación durante los ensayos por líquidos penetrantes y partículas magnéticas.
- **UNE-EN ISO 3452-2:2008. Ensayos no destructivos. Ensayo por líquidos penetrantes. Parte 2: Ensayo de productos penetrantes.**
Esta parte de la norma ISO 3452 especifica los requisitos técnicos y los procedimientos de ensayo aplicables a los productos penetrantes para los ensayos de tipo y de lote. También detalla los requisitos y los métodos para ensayo de control “*in situ*”.

- **UNE-EN ISO 3452-4:1999. Ensayos no destructivos. Ensayo por líquidos penetrantes. Parte 4: Equipo.**

Esta norma europea especifica las características del equipo a utilizar en el ensayo por líquidos penetrantes. Estas características dependen de los sistemas de penetrantes utilizados, del número de ensayos a realizar y de las dimensiones de la pieza a ensayar. Esta norma considera dos tipos de equipos, los adecuados para efectuar ensayos “*in situ*” y las instalaciones fijas.

- **UNE-EN ISO 12706:2009. Ensayos no destructivos. Ensayos por líquidos penetrantes. Vocabulario.**

Esta norma europea define los términos técnicos relativos al ensayo por líquidos penetrantes.

4. Ensayo por ultrasonidos

4.1. Introducción

El ensayo por ultrasonidos se basa en la medición de la propagación del sonido en el medio que constituye la pieza a analizar y tiene aplicación en todo tipo de materiales.

Sus distintas técnicas permiten su uso en dos campos de ensayos no destructivos:

- Control de calidad
- Mantenimiento predictivo

4.2. Principios físicos

De acorde con el manual de estudio de ultrasonidos [6]:

El sonido es simplemente la vibración mecánica de las partículas de un medio elástico.

Las partículas de las que está compuesto un medio vibran individualmente sin cambiar su posición; si la conexión con las partículas adyacentes es suficientemente elástica, provocará que las partículas vibren, lo que permite que el sonido viaje a través del medio.

Destacan tres características asociadas al sonido:

1. Frecuencia
2. Velocidad
3. Longitud de onda

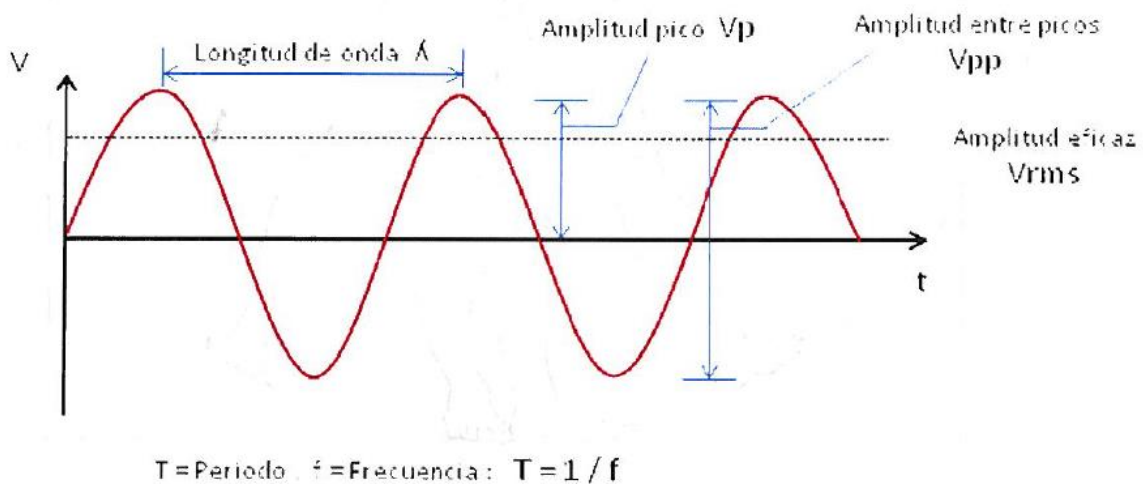


Ilustración 1 - Características del sonido

Para describir con precisión las ondas sinusoidales y otras formas de onda, son necesarios los siguientes parámetros:

Amplitud (A)

Es el valor del desplazamiento máximo de cada partícula del material en su movimiento de oscilación alrededor de su posición de equilibrio.

Frecuencia (f)

El número de ciclos de oscilación por segundo, a la que vibran las partículas, se llama frecuencia de sonido, la cual, en la región audible, determina el tono de una nota musical. El ultrasonido tiene una frecuencia por encima de la que puede ser escuchada por el oído humano, generalmente alrededor de 20.000 ciclos por segundo.

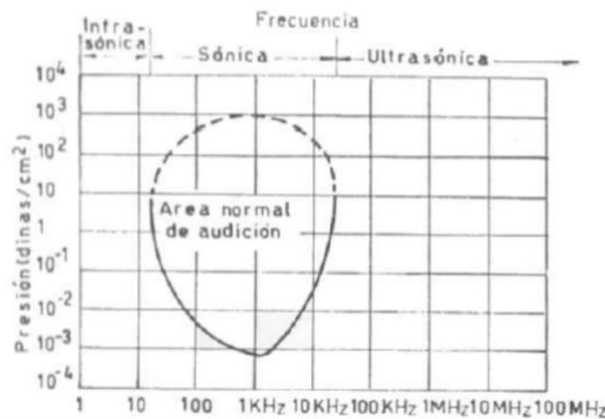


Ilustración 2 - Espectro acústico [7]

La unidad de frecuencia es el Hercio (Hz); 1 Hz es un ciclo completo de vibración por segundo. El sensor utilizado (HC-SR04) trabaja a 40 kHz.

Velocidad Acústica (C)

La rapidez con la que la onda viaja a través de un medio es la velocidad (C). Está determinada por el medio en que se propaga y por el modo de vibración. La velocidad de propagación aumenta si aumentan la densidad y las características mecánicas del material.

La unidad de velocidad es metros por segundo (m/s).

Velocidad máxima de vibración (V)

Es la velocidad propia de la partícula en su movimiento oscilatorio.

Longitud de onda (λ)

La distancia recorrida por el sonido durante un ciclo completo de vibración es la longitud de onda: (λ). Si se representa el desplazamiento respecto de la distancia, para una vibración

simple, se obtiene la siguiente forma de onda, en la cual la distancia entre puntos correspondientes sobre la onda es la longitud de onda.

La longitud de onda determina el reflector más pequeño que se puede detectar, normalmente de $\lambda/2$, también pone de manifiesto la capacidad de los ultrasonidos para penetrar a través de la estructura del material. La longitud de onda es función de la velocidad y la frecuencia del ultrasonido, y se puede expresarse por la relación:

$$\text{Velocidad acústica} = \text{frecuencia} \times \text{longitud de onda} \quad C = f \times \lambda \quad \Rightarrow \quad \lambda = C / f$$

4.3. Ventajas y limitaciones

Ventajas	Limitaciones
<ul style="list-style-type: none"> · Es una técnica muy sensible y que puede cubrir áreas muy grandes en una sola prueba, en comparación con otra técnica de ensayo no destructivo · Fácil acceso a la superficie de los materiales · No representa ningún peligro para el operario · Es portátil, por lo tanto es de gran ayuda para las inspecciones de tuberías a largas distancias de la refinería o tanque · Gran velocidad de prueba; debido a que la operación es electrónica, proporciona indicaciones prácticamente instantáneas de la presencia de discontinuidades · Permite la interpretación inmediata, la automatización y el control del proceso de fabricación · No utiliza radiaciones perjudiciales para el organismo humano y no tiene efectos sobre el material inspeccionado · Seguridad: No requiere condiciones especiales de seguridad 	<ul style="list-style-type: none"> · Está limitado por la geometría, espesor y acabado superficial de los materiales sujetos a inspección · Localiza mejor aquellas discontinuidades que son perpendiculares al haz del sonido · Las partes pequeñas o delgadas son difíciles de inspeccionar por éste método · El personal debe estar calificado y generalmente requiere de mucho mayor entrenamiento y experiencia para este método que para cualquier otro de los métodos de inspección · La interpretación de las indicaciones requiere de mucho entrenamiento y experiencia de parte del operador

Tabla 1 - Ventajas y limitaciones del ensayo por ultrasonidos [8]



4.2.4. Aplicaciones

- Control de calidad de los materiales estructurales (END)
- Detección de heterogeneidades
- Determinación de propiedades (caracterización)
- Medida de espesores (metrología)

4.5. Hardware

El hardware es la parte física del proyecto. Mediante el hardware se obtendrá la información necesaria, a través de los sensores, para enviarla al software (programa), ahí se interpretará esa información y se almacenará o se utilizará para realizar el ensayo pertinente.

Para realizar este ensayo se han utilizado los siguientes componentes:

Componente	Función
<p>2 x Placas Arduino UNO</p> 	<p>Arduino Uno es una placa de micro-controladores basada en el “<i>datasheet</i> ATmega328P”. Tiene 14 pines digitales de entrada/salida, de los cuales 6 se pueden utilizar como salidas PWM, 6 entradas analógicas, un cristal de cuarzo de 16 MHz, una conexión USB, un conector de alimentación, un encabezado ICSP y un botón de reinicio. Se puede conectar al ordenador con un cable USB o con un adaptador de CA a CC a la corriente. [9]</p>
<p>2 x Protoboards</p> 	<p>Una protoboard es una placa que contiene unos orificios conectados eléctricamente entre sí siguiendo un patrón horizontal o vertical. Se ha utilizado para realizar las conexiones de los circuitos electrónicos precisados, insertando en ella los componentes electrónicos necesitados y usando cables como puente.</p>



<p>2 x Sensores de ultrasonidos HC-SR04</p> 	<p>El sensor de ultrasonidos es un dispositivo para medir distancias. Su funcionamiento se basa en el envío de un pulso de alta frecuencia (mediante el Trigger), no audible por el ser humano. Este pulso rebota en los objetos cercanos y es reflejado hacia el sensor, que dispone de un micrófono (Echo) adecuado para esa frecuencia (40kHz).</p>
<p>8 x Cables macho/macho</p> 	<p>Los cables macho/macho se han utilizado para conectar las placas Arduino Uno con los sensores de ultrasonidos HC-SR04.</p>

Tabla 2 - Hardware ultrasonidos

Funcionamiento del sensor de Ultrasonidos HC-SR04

La distancia a la que se encuentra el objeto del sensor de ultrasonidos se puede determinar midiendo el tiempo entre pulsos y conociendo la velocidad del sonido.

La velocidad del sonido es de 343 m/s en condiciones de temperatura de 20°C, 50% de humedad y presión atmosférica a nivel del mar. Si se transforman las unidades resulta:

$$343 \frac{m}{s} \cdot 100 \frac{cm}{m} \cdot \frac{1}{10^6} \frac{s}{\mu s} = \frac{1}{29,2} \frac{cm}{\mu s}$$

Ecuación 1 - Transformación unidades del sonido

El sonido tarda 29,2 microsegundos en recorrer un centímetro. Por tanto, se puede calcular la distancia a partir del tiempo entre la emisión y la recepción del pulso a través de esta ecuación:

$$Distancia (cm) = \frac{Tiempo (\mu s)}{29,2 \cdot 2}$$

Ecuación 2 - Distancia que recorre el sonido

Se divide el tiempo entre 2 ya que la distancia recorrida por el pulso es el doble de la que queremos medir a causa de que se mide el tiempo que tarda el pulso en ir y volver.

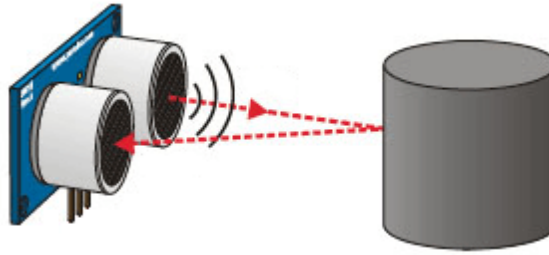


Ilustración 3 - Distancia ultrasonidos [10]

El rango teórico del sensor HC-SR04 es de 2 cm a 400 cm, con un error de 0,3 cm. Pero en la práctica el rango de medición real es mucho más limitado, en torno a 20 cm 200 cm. [10]

Los sensores de ultrasonidos son sensores de baja precisión. La orientación de la superficie a medir puede provocar que la onda se refleje, falseando la medición. Además, no resultan adecuados en entornos con un gran número de objetos, dado que el sonido rebota en las superficies generando ecos y falsas mediciones. Tampoco son apropiados para el funcionamiento en el exterior y al aire libre.

Los esquemas del dispositivo se encuentran en el Anexo B. El montaje final del hardware es el siguiente:

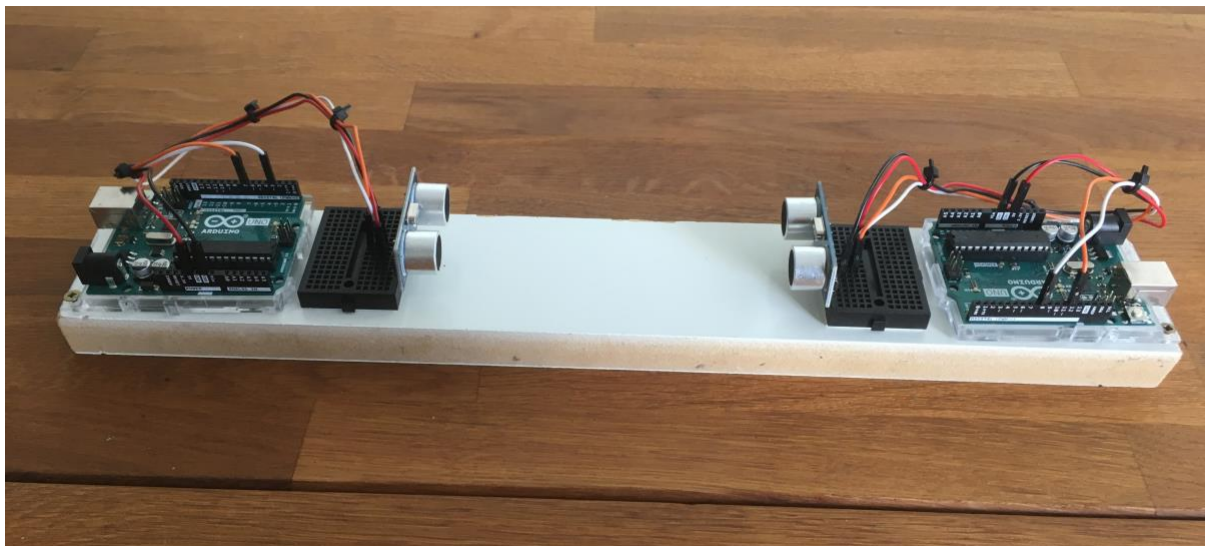


Ilustración 4 - Dispositivo de ultrasonidos

4.6. Software

Para implementar un correcto funcionamiento del sistema de ultrasonidos y una rápida y fácil interacción entre usuario y dispositivo, el programa diseñado sigue la secuencia lógica representada por el diagrama de flujo que se puede observar en la ilustración 5. El programa está implementado con LabVIEW 2017. Las capturas de pantalla del block diagram (panel de LabVIEW dónde se encuentra el código) están mostradas en el Anexo C.

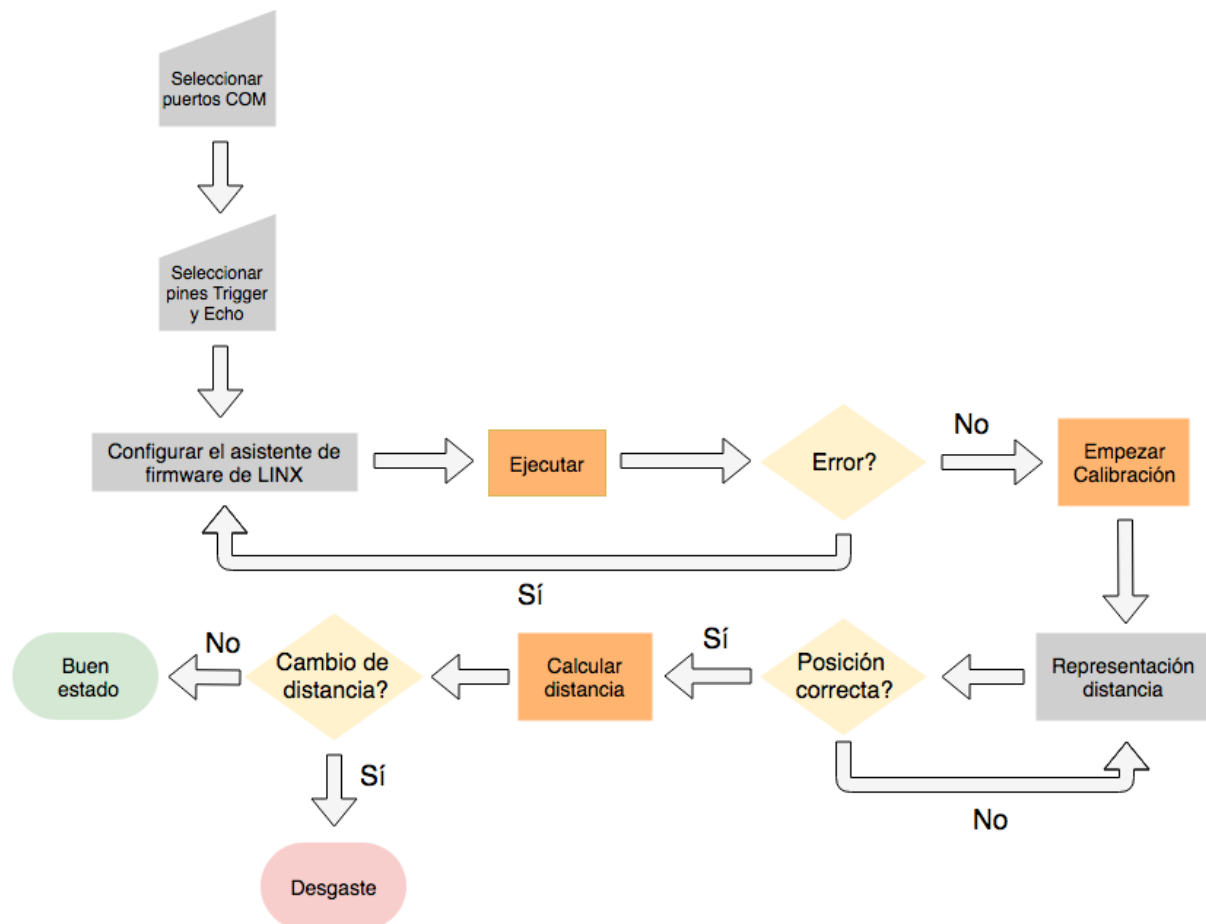


Ilustración 5 - Diagrama de flujo del sistema de ultrasonidos

La primera acción necesaria que se debe realizar es seleccionar los puertos COM, así, el programa sabrá en qué puertos USB se han conectado las dos placas Arduino.

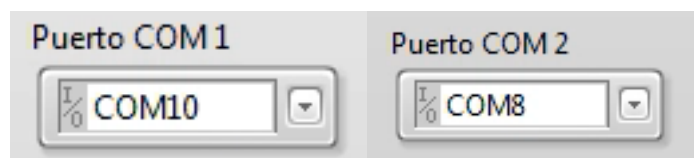


Ilustración 6 - Definición de puertos COM

Una vez definidos los puertos COM, se tendrán que seleccionar los pines de Trigger y Echo de cada dispositivo. Estos pines corresponden a la emisión de ondas ultrasónicas (Trigger) y a la recepción de esas ondas (Echo) y se deberán escoger los pines que se han utilizado en cada dispositivo.

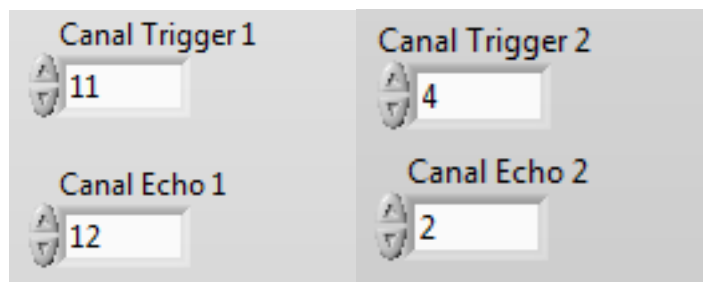


Ilustración 7 - Selección de pines

El paso siguiente será configurar el asistente de firmware de LINX. Esta operación es la encargada de subir el código dentro de la placa Arduino. Si no se hace la configuración, el programa no funcionará ya que saltará un mensaje de error informando que no encuentra la placa Arduino en el COM correspondiente. En el asistente, se deberá definir qué tipo de placa, qué modelo y en qué puerto COM está la placa que queremos configurar.

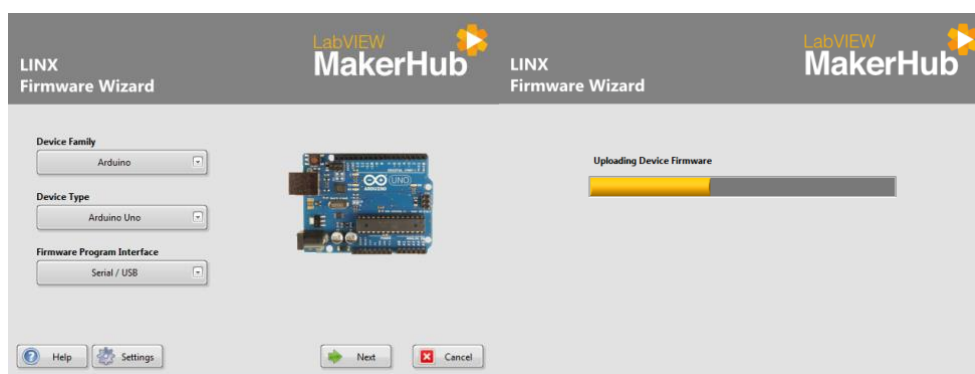


Ilustración 8 - Configuración del asistente de firmware de LINX

Al tener las dos placas cargadas, el programa estará listo para ejecutarse. Si se abre una ventana de error, querrá decir que no se ha llevado a cabo bien la subida de código a alguno de los Arduinos y por tanto, será necesario repetir la operación anterior. El mensaje de error indicará que los puertos COM no están definidos.

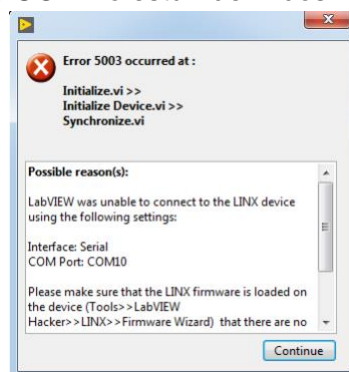


Ilustración 9 - Error de carga de LINX

Si el programa no da error, estará listo para empezar la calibración. Se debe pulsar el botón de empezar calibración y los indicadores de cada uno de los sensores darán la distancia en que se encuentra el objeto a ensayar. Una vez se tenga el objeto en la posición deseada se podrá pasar a calcular la distancia.

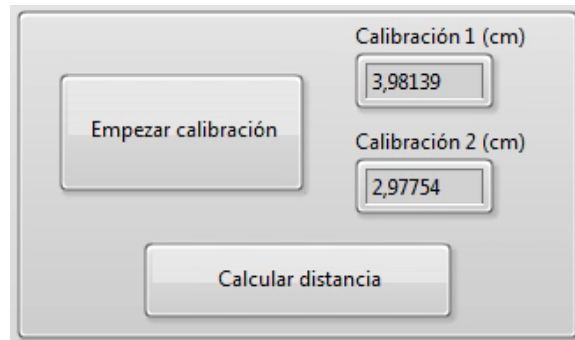


Ilustración 10 - Calibración de los sensores

Al pulsar el botón “Calcular distancia”, los sensores de ultrasonidos empezarán a medir la distancia y se activará el *waveform chart*, que es un gráfico que representará a tiempo real las distancias de los sensores de ultrasonidos, dibujando así el perfil de la pieza la cual se está ensayando. El programa también consta de un led y un indicador numérico, que cuando detecten que hay una distancia distinta a la calibrada, se activarán poniéndose en rojo el led y el indicador numérico mostrará la diferencia de distancia.

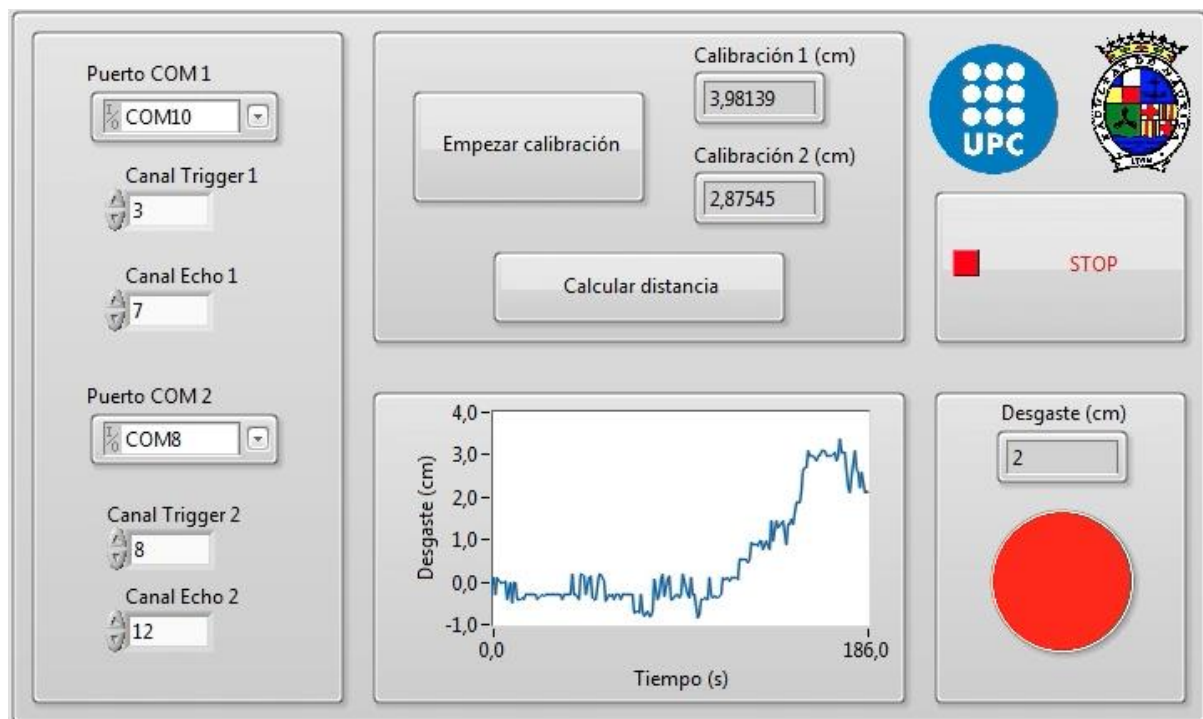


Ilustración 11 - Cálculo de la distancia

Al haber hecho el recorrido de toda la pieza a ensayar se deberá pulsar el botón de STOP, el programa se parará automáticamente y el ensayo habrá concluido.

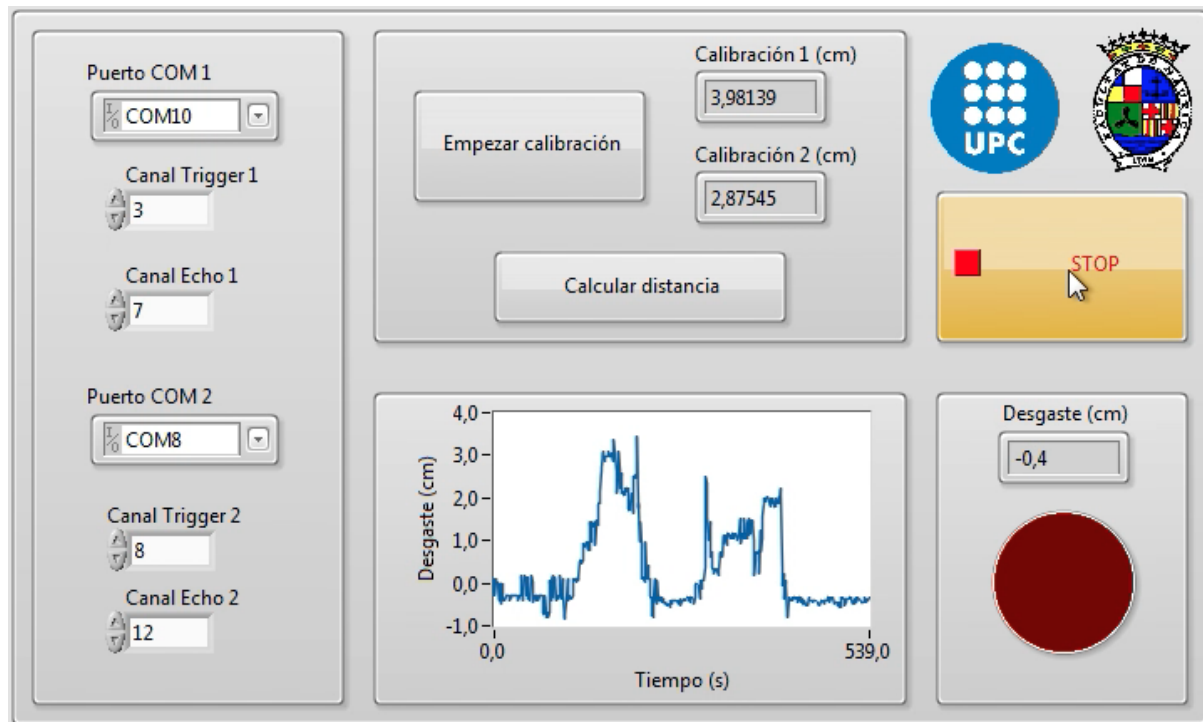


Ilustración 12 - Finalización del ensayo

La pieza ensayada es un trozo de madera que representa un recorte de un mamparo, que tiene dos puntos dónde hay una falta de material y por lo tanto, disminuye la sección. El programa, mediante el indicador numérico, el led y el chart, informará de esta falta de material cuando el dispositivo esté ensayando por esa zona. La muestra ensayada está representada en la siguiente ilustración:

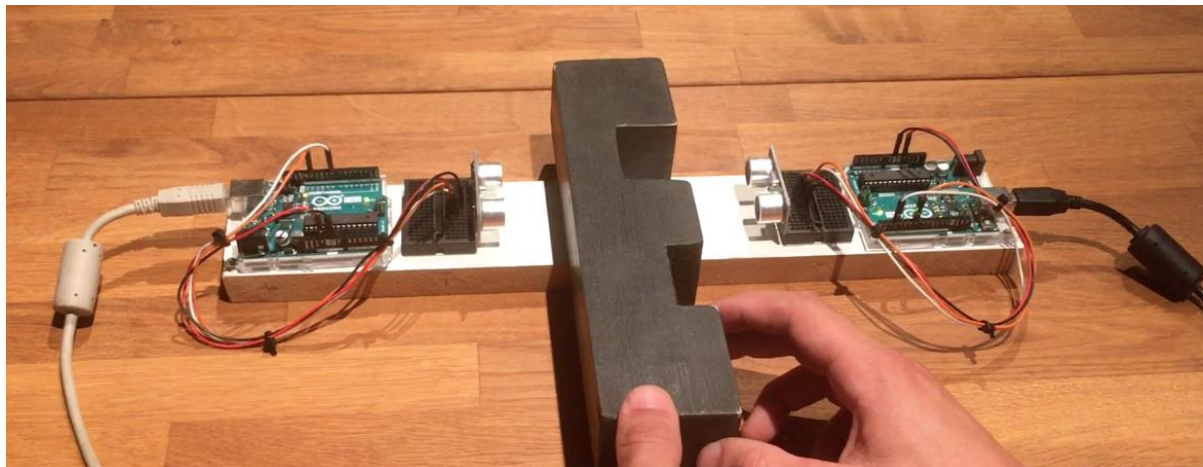


Ilustración 13 - Ensayo por ultrasonidos, muestra.

4.7. Resultados

Esta sección está dedicada a revisar los resultados obtenidos y validar cuáles son los adecuados para cumplir los objetivos del proyecto.

En la Ilustración 12 se pueden ver los resultados del ensayo por ultrasonidos. En la primera falta de material que se encuentra, se puede ver que la medida de la holgura es de 3 cm y en la segunda de 2 cm. Para hacer la validación de estos resultados, se han medido las holguras con una cinta métrica y en las siguientes ilustraciones, se puede apreciar que las mediciones son correctas.

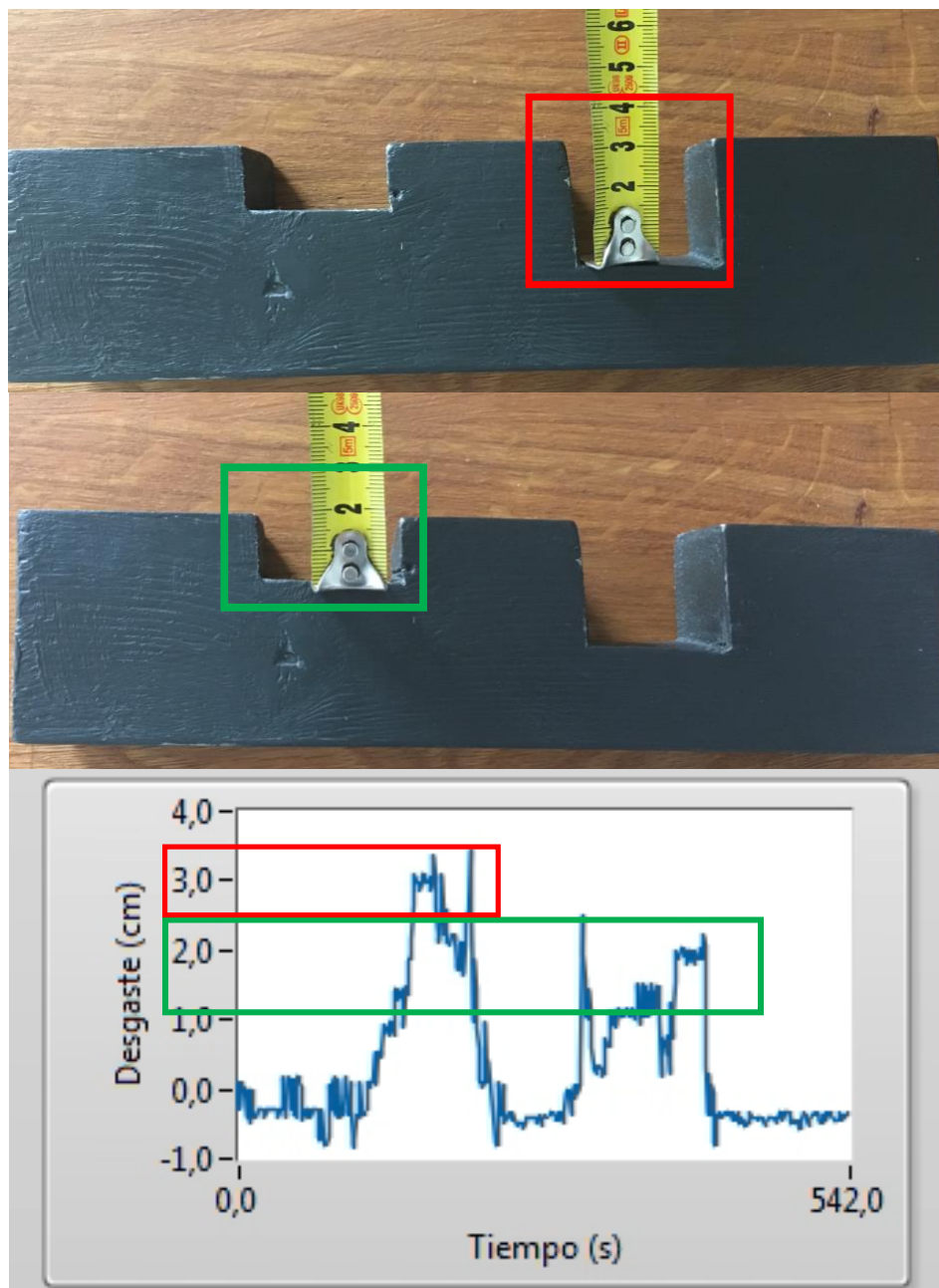


Ilustración 14 - Resultados ensayo ultrasonidos

5. Ensayo por partículas magnéticas (Sonda Hall)

5.1. Introducción

En este capítulo se realizará una sonda Hall que tendrá como función calcular el campo magnético existente durante una inspección por partículas magnéticas.

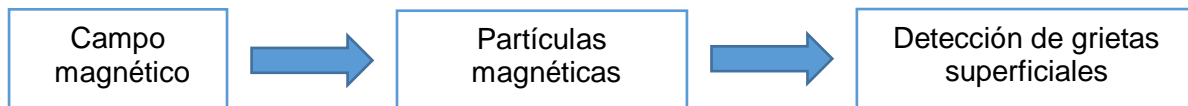
El método de ensayo no destructivo por partículas magnéticas es capaz de detectar discontinuidades superficiales así como subsuperficiales, dibujando sobre la superficie del material, la forma aproximada y localización de discontinuidades. La capacidad del método para obtener una indicación de la discontinuidad, está determinada por las características del campo magnético aplicado, las características magnéticas del material y las características de la discontinuidad.

Entrando en el campo inductor, es preciso que éste tenga un valor y una dirección determinados; el rango aceptable en la magnitud del campo magnético inductor, asegura una magnetización óptima de la pieza objeto del ensayo. En cuanto a su dirección, permitirá la detección de discontinuidades orientadas favorablemente, longitudinales o transversales.

El método de partículas magnéticas sólo es de aplicación en aquellos materiales que permitan su magnetización. Éstos son los materiales ferromagnéticos, dado que son los únicos que alcanzan un grado de magnetización suficiente para permitir la detección de discontinuidades de un modo fiable.

La detectabilidad de una discontinuidad depende de su profundidad y morfología. Aunque el método permite la detección de discontinuidades que no están abiertas a la superficie, se verá cómo a medida que aumenta su profundidad, la sensibilidad del ensayo disminuye grandemente. Otra cuestión básica será la orientación de la discontinuidad respecto del campo magnético. El caso deseable será que ambos sean perpendiculares entre sí. Cuando se conozca la orientación de la discontinuidad la solución a éste problema es sencilla, pero en la mayoría de ocasiones, esta cuestión es desconocida, lo que obligará a generar en el producto de ensayo, al menos, dos campos magnéticos perpendiculares entre sí, para poder asegurar que independientemente de la orientación de la discontinuidad, al menos uno de los campos magnéticos es distorsionado de modo perceptible.

Este método de ensayo está basado en el principio de que las líneas de fuerza existentes en un objeto magnetizado, se distorsiona localmente por la presencia de una discontinuidad. Esta distorsión obliga a que parte de las líneas de fuerza magnéticas salgan y vuelvan a entrar en el objeto que se ensaya, allí donde se encuentra la discontinuidad. Este fenómeno se llama fuga de flujo magnético generando sobre la superficie del material lo que se conoce como “campo de fuga”. Si se espolvorean limaduras de hierro por encima del material a ensayar, esta fuga de flujo es capaz de atraer estas limaduras y se producen acumulaciones en algunas zonas que son precisamente aquellas en donde existen discontinuidades, como si formasen un puente metálico para suplir la falta de material. [1]



5.2. Ensayo por partículas magnéticas

El ensayo por partículas magnéticas es una combinación de dos métodos de ensayos no destructivos (END):

- **Ensayo de fuga de flujo magnético:** Se sabe que, al acercar el extremo de un imán al de otro, dichos extremos se atraen unas veces y se repelen otras. Ello es consecuencia de que existen unas líneas de fuerzas magnéticas asociadas a cada imán, que interactúan entre sí. Estas líneas son cerradas, por lo que existen tanto en los extremos (polos) del imán como en su interior. Cuando una línea de fuerza magnética ubicada en el interior de un imán interacciona con una discontinuidad superficial o subsuperficial, se verá obligada a salir del interior, lo que origina en la superficie donde se encuentra la discontinuidad un campo de fuga.
- **Ensayo visual:** La fuga magnética citada puede asociarse a la existencia de un nuevo imán con dos nuevos polos, por lo que, si se espolvorean limaduras de hierro donde existe la fuga magnética, quedarán retenidas encima de la discontinuidad, formando una indicación.

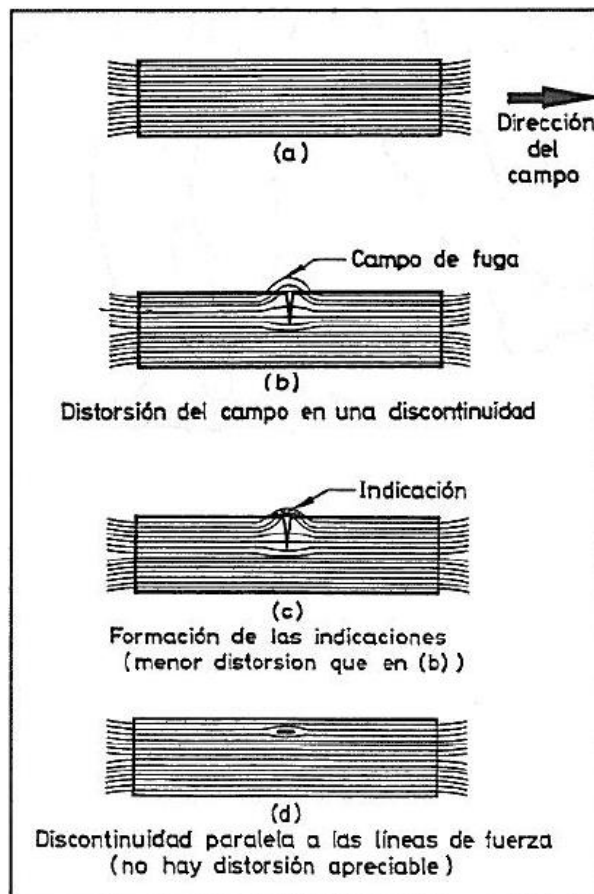


Ilustración 15 – Indicaciones en el ensayo por partículas magnéticas [11]

El ensayo por partículas magnéticas se basa en el fenómeno que se esquematiza en la ilustración 15 y que consiste en lo siguiente:

- Cuando una pieza de material ferromagnético se somete a la acción de un campo magnético, las discontinuidades presentes en el material distorsionan sus líneas de fuerza.
- Si la discontinuidad está abierta a la superficie o cerca de ella, algunas líneas salen de la pieza formando un campo de fuga.
- Al aplicar partículas magnéticas sobre la superficie, algunas serán capturadas por los campos de fuga y formarán indicaciones al acumularse que dibujarán el trazado superficial de la discontinuidad.
- Si el plano de la discontinuidad es paralelo a las líneas de fuerza, no se producirá el campo de fuga y no habrá formación de indicación.

El proceso a seguir en una inspección por partículas magnéticas sería el representado en la ilustración 16.

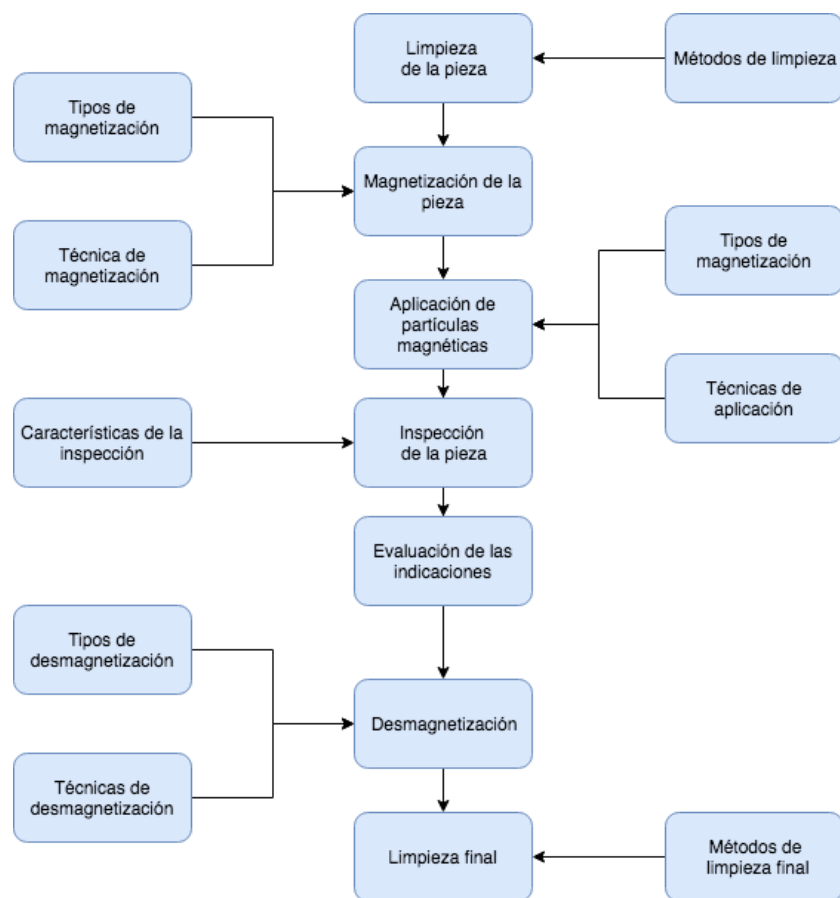


Ilustración 16 - Esquema inspección por partículas magnéticas

La inspección por partículas magnéticas puede tener lugar tanto en la etapa de fabricación como en la de servicio.

Inspecciones en fabricación: El método de partículas magnéticas es uno de los preferentes para la detección de las discontinuidades producidas en los procesos de fabricación. Se utiliza en la producción y la elaboración primaria, en ensayos de fabricación y elaboración secundaria, en la forja, en el moldeo, en la soldadura, en los mecanizados y también en los tratamientos.

Inspecciones en servicio: El ensayo por partículas magnéticas es un método de utilización muy usado para detección de las discontinuidades producidas en servicio y en las operaciones de mantenimiento o de revisión. Por ejemplo, puede detectar grietas de fatiga y sobretensión, las debidas a la corrosión y las de fragilización por absorción de hidrógeno.

5.3. Principios físicos

Campos magnéticos

Un campo magnético es una magnitud vectorial que representa la intensidad de la fuerza magnética. El magnetismo es la propiedad de acción y repulsión de determinados metales e imanes, que presentan un polo positivo y otro negativo, caracterizado por las fuerzas de dipolo. Las fuerzas de dipolo consisten en la repulsión de los polos iguales y la atracción de los polos distintos.

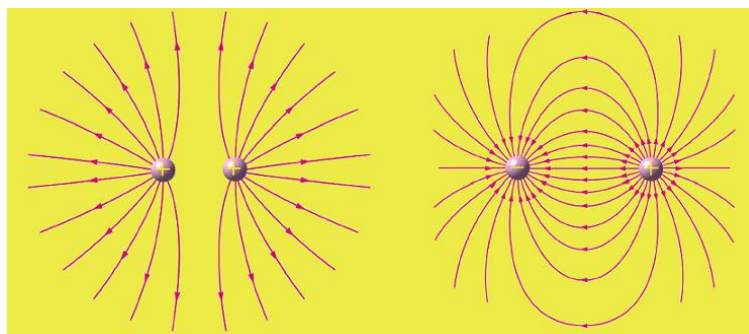


Ilustración 17 - Campo magnético. Fuerzas de dipolo

Polos magnéticos

Si se colocan limaduras de hierro encima de un papel, debajo del cual se ha puesto un imán, se puede observar que éstas se sitúan alrededor de ciertas regiones y forman una figura como la de la ilustración 18 llamada espectro, compuesta de líneas nombradas líneas de fuerza.

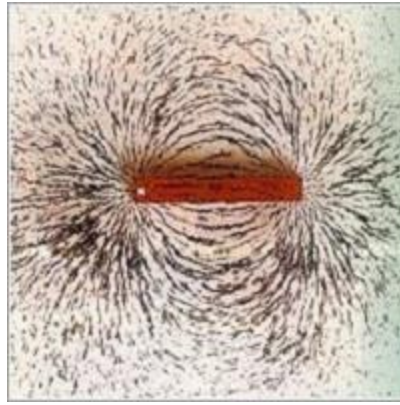


Ilustración 18 - Espectro. Partículas magnéticas

Las partículas tienden a juntarse en determinadas zonas del imán, principalmente en los extremos. Estas zonas donde se unen las líneas de fuerza se llaman polos magnéticos. Uno es el polo norte y el otro sur, ya que están atraídos por los polos de la Tierra. Como se puede ver en la ilustración 18, las limaduras de hierro son atraídas por todas las superficies del imán, pero la mayor fuerza de atracción se da en los polos.

Líneas de fuerza

Las líneas de fuerza representan los puntos del campo magnético con el mismo vector de inducción, es decir, aquellos puntos que tienen igual capacidad de magnetizar a otros materiales, y tienen asignadas propiedades importantes como:

- Son líneas continuas y cerradas que nunca se rompen
- No se cruzan unas con otras
- Se les atribuye una dirección: salen del polo norte y, viajando a través del espacio, entran dentro del imán por el polo sur y vuelven al polo norte a través del imán
- Su densidad decrece al aumentar la distancia entre los polos
- Buscan el camino de menor resistencia o reluctancia magnética, o lo que es lo mismo, de mayor permeabilidad magnética

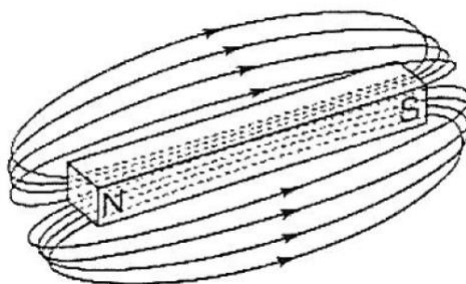


Ilustración 19 – Representación de las líneas de fuerza del campo magnético de un imán de barra [11]

Magnitudes magnéticas

De acorde con el manual de estudio de partículas magnéticas [11]:

Magnitud	Símbolo	SI
Campo inductor	H	Amperio/metro (A/m)
Flujo magnético		Weber (Wb)
Densidad de flujo	B	Tesla (T)

Tabla 3 - Magnitudes magnéticas

5.4. Ventajas y limitaciones

Ventajas	Limitaciones
<ul style="list-style-type: none"> • Es el más sensible para detectar discontinuidades superficiales • Puede detectar discontinuidades sub-superficiales • Forma una imagen de la discontinuidad sobre la superficie de la pieza • Ajuste y comprobaciones previas sencillas • Resultados menos dependientes del factor humano que el método de líquidos penetrantes • Limpieza previa menos exigente que el método de líquidos penetrantes • Puede detectar grietas incluso debajo de capas de pintura o recubrimiento de espesor limitado • Puede aplicarse a piezas de cualquier tamaño • Mayor rapidez que el método de líquidos penetrantes 	<ul style="list-style-type: none"> • Sólo es aplicable a materiales ferromagnéticos • El campo magnético debe tener una dirección lo más perpendicular posible al plano de la discontinuidad, lo que suele obligar a dos o más etapas de magnetización en diferentes direcciones • En general, es necesario desmagnetizar después de la inspección • La presencia de capas de pintura o recubrimientos electrolíticos puede afectar negativamente a la sensibilidad • A veces, es necesario aplicar corrientes de muy elevada intensidad • Existe riesgo de quemadura local en las zonas de contacto de la

Tabla 4 - Ventajas y limitaciones del ensayo por partículas magnéticas

5.5. Generación de campos magnéticos

Magnetización por electroimán

En las inspecciones por partículas magnéticas se suele usar el yugo electromagnético. El yugo tiene forma de U, que suele tener los brazos móviles para poder adaptarlo a piezas de formas diferentes. Esto permite también variar la distancia entre polos, modificando así la intensidad del campo magnético. El yugo electromagnético induce un campo magnético longitudinal entre sus polos (extremos de la U), y son usados para realizar una magnetización local. El campo magnético es generado en un sistema de bobina, localizada dentro del yugo, y transmitido a la pieza a través de sus polos. También pueden incluir la posibilidad de utilizar corriente alterna y continua (rectificada).

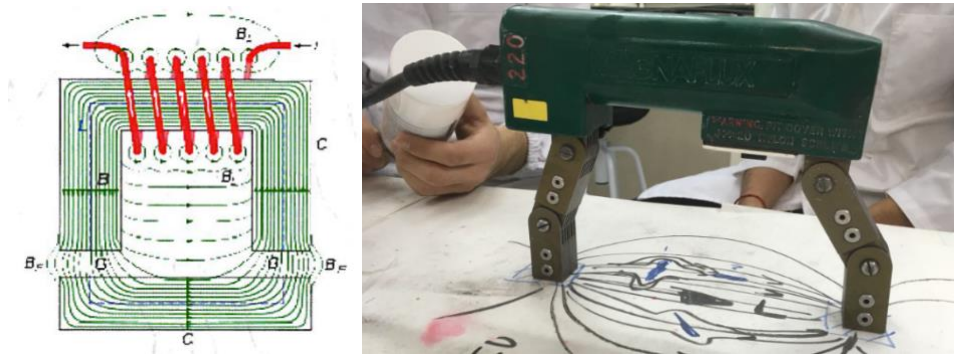


Ilustración 20 - Esquema yugo electromagnético Ilustración 21 - Yugo electromagnético

5.6. Sonda Hall

El efecto Hall consiste en la producción de una caída de voltaje a través de un conductor o semiconductor con corriente, bajo la influencia de un campo magnético externo. Para esto es necesario que la dirección del campo magnético sea perpendicular a la dirección del flujo de la corriente.

El campo magnético transversal ejerce una fuerza desviadora (Fuerza de Lorentz) sobre el conductor o semiconductor. Esta fuerza causa la desviación de los portadores de carga que se mueven a través del material. Como resultado, aparece una diferencia de potencial V_{xy} (denominada voltaje Hall) entre los extremos del conductor. Este voltaje es proporcional a la intensidad del campo magnético aplicado y su polaridad depende del signo de los portadores de carga.

El efecto Hall se presenta en conductores y en semiconductores. Las diferencias de potencial producidas en tiras metálicas son muy pequeñas, siendo a menudo enmascaradas por el ruido. Por esto, se usan materiales semiconductores especiales, donde el efecto Hall es más notable. En estos casos, el elemento básico es generalmente una tira de arseniuro de galio (GaAs) o de indio (InAs) la cual, cuando se polariza mediante una corriente constante y se sumerge en un campo magnético transversal a su superficie, genera un voltaje proporcional a la intensidad del campo. Este voltaje es reforzado por un amplificador operacional incorporado en el dispositivo y se procesa para proporcionar una señal de salida útil. [12]

Se puede determinar la magnetización midiendo la intensidad del campo tangencial mediante una sonda Hall. Para obtener la intensidad de campo requerida, se deben considerar tres factores dependiendo del método de magnetización y la localización de la medición.

Orientación del sensor de campo

El plano sensible al campo del sensor debería mantenerse normal a la superficie. Si existe un componente normal al campo, una inclinación puede introducir un error substancial.

Proximidad a la superficie del sensor de campo

Si el campo varía de forma importante dependiendo de su distancia a la superficie, puede ser necesario realizar dos mediciones a distancias diferentes para deducir el valor en la superficie.

Dirección del campo magnético

Para determinar la dirección y magnitud del campo, se debe girar el sensor a fin de obtener la lectura máxima.

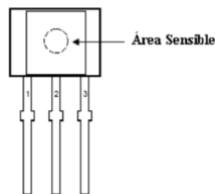


Ilustración 22 - Sensor Hall [12]


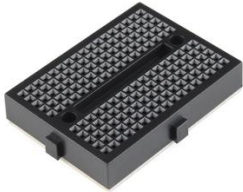
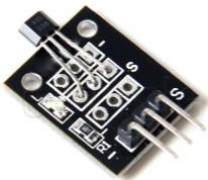

La sonda Hall realiza mediciones a distancia sin necesidad de tener contacto físico.

5.7. Aplicaciones

La sonda Hall se utiliza para medir el campo magnético tangencial en microTeslas (mT) en un ensayo por partículas magnéticas. Midiendo éste campo, se puede saber, por ejemplo, si el yugo electromagnético está funcionando bien, si funciona con alguna anomalía y si se está magnetizando satisfactoriamente la pieza a ensayar.

5.8. Hardware

Mediante éste hardware se obtendrá un voltaje que provendrá del sensor Hall y se realizará un software para transformar ésta señal de voltaje (mV) en unidades de campo magnético (mT). Las partes que constituirán este sistema son las siguientes:

Componente	Función
<p>1 x Placa Arduino UNO</p> 	<p>Arduino Uno es una placa de micro-controladores basada en el “datasheet ATmega328P”. Tiene 14 pines digitales de entrada/salida, de los cuales 6 se pueden utilizar como salidas PWM, 6 entradas analógicas, un cristal de cuarzo de 16 MHz, una conexión USB, un conector de alimentación, un encabezado ICSP y un botón de reinicio. Se puede conectar al ordenador con un cable USB o con un adaptador de CA a CC a la corriente. [9]</p>
<p>1 x Protoboard</p> 	<p>Una protoboard es una placa que contiene unos orificios conectados eléctricamente entre sí siguiendo un patrón horizontal o vertical. Se ha utilizado para realizar las conexiones de los circuitos electrónicos precisados, insertando en ella los componentes electrónicos necesitados y usando cables como puente.</p>
<p>1 x Sensor de efecto Hall 49E</p> 	<p>El sensor de efecto Hall es el encargado de obtener una señal de inducción magnética y transformarla en una señal de voltaje (mV).</p>
<p>3 x Cables macho/macho</p> 	<p>Los cables macho/macho se han utilizado para conectar las placas Arduino Uno con el sensor Hall a través de la protoboard.</p>

Funcionamiento del sensor de efecto Hall

Este tipo de sensor Hall incorpora la electrónica necesaria para dar una respuesta de tensión lineal en el rango de -100 a 100 mT. Los circuitos están diseñados para minimizar el ruido de la señal, por lo que no es necesario aplicarle un filtro externo. La sensibilidad del sensor a 25°C es de 0.18 mV/mT.

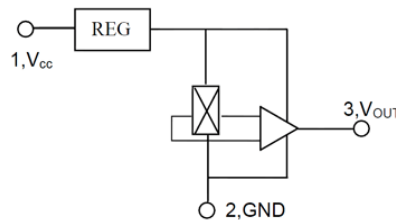


Ilustración 23 – Esquema electrónico del sensor Hall [13]

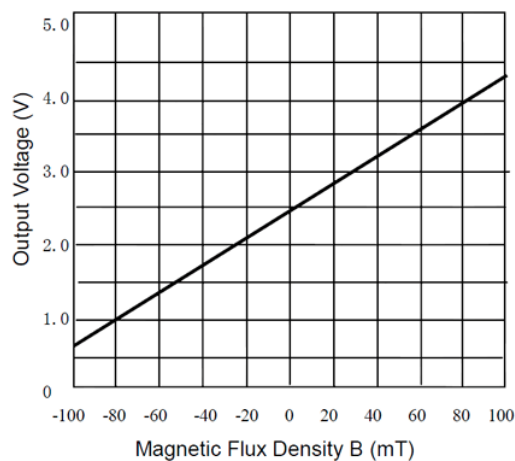


Ilustración 24 - Relación entre voltaje de salida y densidad de flujo magnético del sensor Hall 49E [13]

Si se interpola la gráfica anterior se obtendrá la siguiente expresión para la respuesta en tensión respecto al flujo magnético medido por el sensor Hall 49E:

$$V = 0.0188 \cdot B + 2.5$$

Ecuación 3 - Recta voltaje-flujo magnético

Si se invierte la ecuación, se obtiene la ecuación necesaria para poder obtener la densidad de flujo magnético a partir de la respuesta del sensor:

$$B = 53.33 \cdot V - 133.3$$

Ecuación 4 - Densidad de flujo magnético

Hardware finalizado

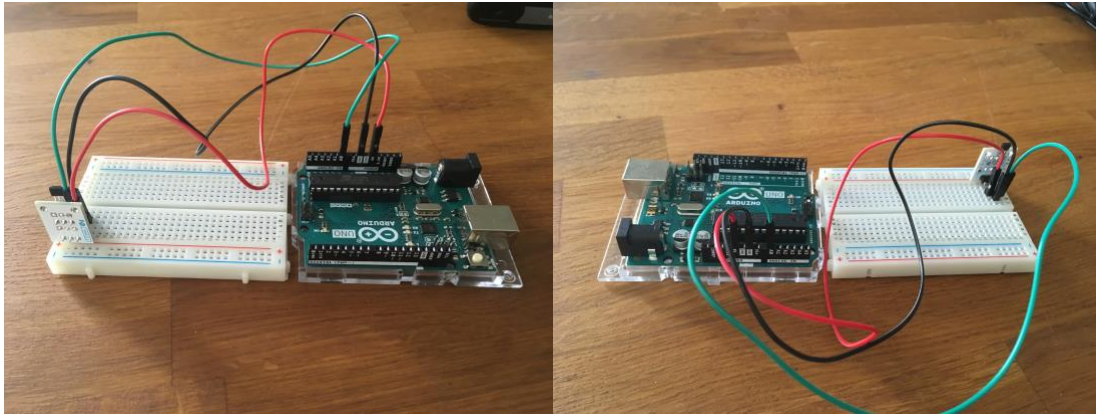


Ilustración 25 - Montaje final Sonda Hall

En el Anexo D se puede ver los esquemas del diseño de la sonda Hall.

5.9. Software

En este ensayo el software está diseñado por una parte con la aplicación de Arduino y la otra con LabVIEW.

En primer lugar, se ha realizado el código Arduino donde se define el pin de entrada de señal analógica (A0), se configura el sensor para que pueda obtener datos y se aplica la *ecuación 4*, para hacer el cálculo de la densidad de flujo magnético a partir del voltaje recibido. El código Arduino y el de LabVIEW se pueden encontrar en el Anexo E.

Para controlar la sonda Hall se ha diseñado una interfaz con LabVIEW para facilitar la interacción del programa con el usuario y poder tener una mejor percepción de los resultados obtenidos. A continuación se muestra la secuencia lógica, representada por un diagrama de flujo, que se debe seguir para el correcto funcionamiento de la sonda.

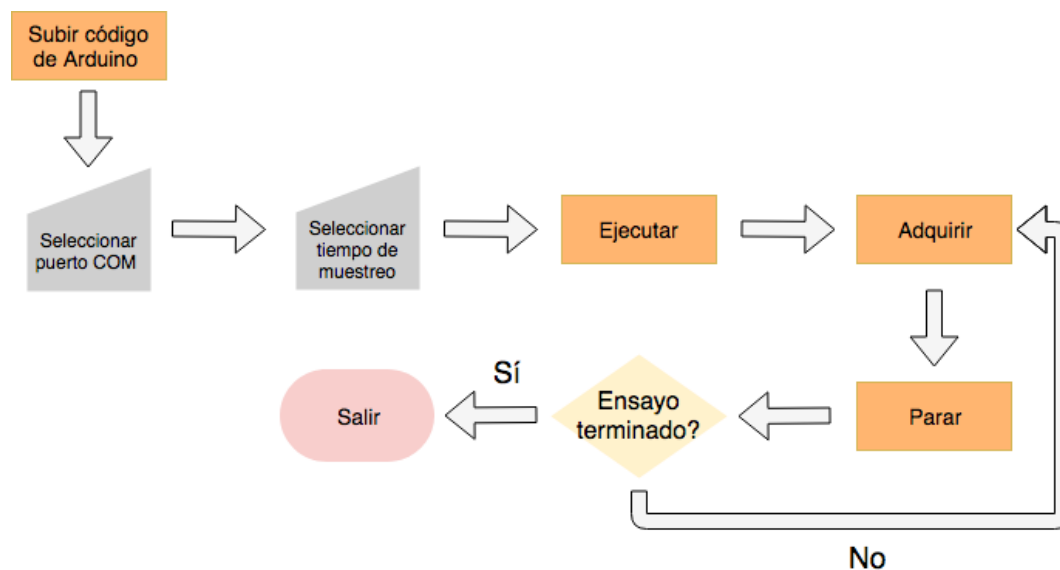


Ilustración 26 - Diagrama de flujo de la sonda Hall

El primer paso a seguir es subir el código realizado desde la aplicación Arduino a la placa, para que ésta pueda responder cuando le llegue información desde LabVIEW.

Una vez subido el código, ya en la interfaz de LabVIEW se deberá seleccionar el puerto COM dónde está conectado el dispositivo y definir el tiempo de muestreo. Este tiempo de muestreo, expresado en milisegundos, definirá cada cuando el sensor realizará una medida.

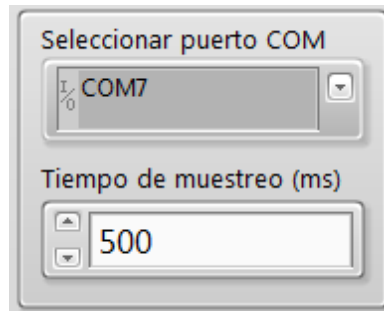


Ilustración 27 - Selección puerto COM y tiempo de muestreo

Al tener estas variables definidas, se deberá ejecutar el programa y cuando se quiera realizar la medición, pulsar el botón de adquirir datos.



Ilustración 28 - Sonda Hall adquiriendo datos

Al tener la medida requerida, se debe pulsar el botón de parar. Si se quiere hacer otra medición, se puede adquirir datos otra vez, pero si ha finalizado la obtención de datos, pulsando el botón salir se termina el ensayo.

5.10. Resultados

Para realizar el ensayo, se ha utilizado la sonda Hall durante el funcionamiento de un yugo electromagnético como se puede visualizar en la ilustración 29.



Ilustración 29 - Sonda Hall con el yugo electromagnético

En cuanto al voltaje, se puede ver que el sensor envía aproximadamente unos 4,8 V de señal. El funcionamiento normal del sensor según su *Datasheet* [14], es de entre 2,7 a 6,5, por lo tanto, el voltaje que llega al software está entre los valores normales de funcionamiento.

La densidad de flujo magnético, que es calculada mediante la *ecuación 4*, tiene un valor de 25,58 mT durante el funcionamiento del yugo. Estos resultados no se han podido comparar, ya que no se disponía de una sonda Hall homologada y por lo tanto no se puede determinar ni comprobar los resultados obtenidos después de la medición.

6. Ensayo por termografía

6.1. Introducción

La termografía es una técnica no destructiva y sin contacto que está basada en la radiación térmica o energía infrarroja que los cuerpos emiten o reflejan. Esta energía se emite en forma de ondas electromagnéticas que viajan a la velocidad de la luz a través del aire o por cualquier otro medio de conducción y está en relación directa con su temperatura, es decir, cuanto más caliente está el objeto, mayor cantidad de energía emite y menor longitud de onda tiene esa energía. La emisión se hace en longitudes de onda mayores a las que el ojo humano es capaz de captar y por lo tanto es invisible.

6.2. Principios físicos

Existe una correlación entre la temperatura de un cuerpo y la intensidad de la radiación infrarroja que emite.

Una cámara termográfica mide la onda larga de la radiación infrarroja recibida en el campo de visión, a partir de la cual calcula la temperatura del objeto a medir. El cálculo tiene en cuenta la emisividad (ϵ) de la superficie del objeto medido así como la compensación de la temperatura reflejada (RTC).

Cada píxel del detector representa una marca térmica que se muestra en el visualizador como una imagen de color simulada.

La imagen termográfica muestra la distribución de temperatura en la superficie de un objeto, por lo que una cámara termográfica no se debe usar para observar en el interior o a través de los objetos. [14]

Emisión, reflexión y transmisión

- Emisividad (ϵ): Es la propiedad que indica la eficacia de un material de emitir (propagar) radiación infrarroja. Varía según las propiedades de la superficie, el material, y, depende del material, según la temperatura del objeto medido.

Existe un objeto ideal al que se llama cuerpo negro que emite la máxima radiación posible en todas las temperaturas. Se considera que tiene $\epsilon=1$. Partiendo de este número, la emisividad de los objetos reales es la relación entre la energía térmica que emite su superficie y la de un cuerpo negro a la misma temperatura, por tanto su valor tendrá un mínimo de 0 y un máximo de 1.

- Reflexión (ρ): Es la propiedad que indica la capacidad de un objeto de reflejar la radiación infrarroja. Depende de las propiedades de la superficie, la temperatura y el tipo de material. La medición de la temperatura reflejada es expresada con RTC's (Compensación de la Temperatura Reflejada). Mayoritariamente la RTC se corresponde con la temperatura ambiente.

· **Transmisión (τ):** Es la propiedad que mide la capacidad de un material de transmitir la radiación infrarroja. Muchos materiales no son transmisivos ya que ésta depende del tipo y del grosor del material.

· **Ley de radiación de Kirchhoff's:** La radiación infrarroja que se registra en la cámara termográfica es la suma de la radiación emitida por el objeto medido, la reflexión de la radiación ambiente y la transmisión de radiación del objeto medido. La suma de estos factores siempre debe ser 1.

$$\varepsilon + \rho + \tau = 1$$

Ecuación 5 - Ley de radiación de Kirchhoff's

La transmisión es inapreciable, entonces:

$$\varepsilon + \rho = 1$$

Ecuación 6 - Ley de radiación de Kirchhoff's simplificada

Es decir, que a menor emisividad, mayor proporción de radiación infrarroja reflejada, mayor dificultad en la toma de mediciones precisas de temperatura y eso se traduce en una mayor importancia de la correcta configuración de la compensación de la temperatura reflejada (RTC). [14]

6.3. Ventajas y limitaciones

Ventajas	Limitaciones
<ul style="list-style-type: none"> · Ofrece un patrón térmico completo de la situación en “tiempo real” · No requiere contacto, no es destructiva ni intrusiva · Identifica y localiza las anomalías térmicas · Almacena la información térmica · Permite un análisis detallado 	<ul style="list-style-type: none"> · Capacidad limitada para identificar defectos internos, cuando el defecto no se manifieste externamente por aumento de temperatura · Los efectos solares o superficies brillantes pueden enmascarar o confundir defectos, pero son detectables por software y corregibles por el operario

Tabla 5 - Ventajas y limitaciones de la termografía infrarroja

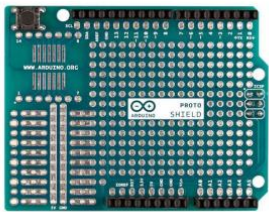

6.4. Aplicaciones

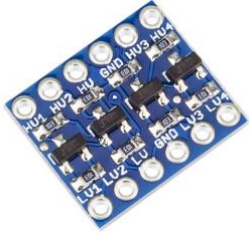

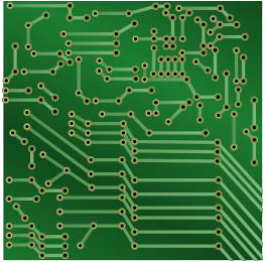

Este ensayo se utiliza para el mantenimiento preventivo y también en el predictivo y algunas de sus aplicaciones son las siguientes:


- Sistemas eléctricos
- Sistemas mecánicos
- Construcción
- Hornos y calderas
- Visualización de flujo
- Tanques y depósitos

6.5. Hardware

Para realizar este ensayo se han utilizado los siguientes componentes:

Componente	Función
<p>Placa Arduino UNO</p> 	<p>Arduino Uno es una placa de micro-controladores basada en el “datasheet ATmega328P”. Tiene 14 pines digitales de entrada/salida, de los cuales 6 se pueden utilizar como salidas PWM, 6 entradas analógicas, un cristal de cuarzo de 16 MHz, una conexión USB, un conector de alimentación, un encabezado ICSP y un botón de reinicio. Se puede conectar al ordenador con un cable USB o con un adaptador de CA a CC a la corriente. [9]</p>
<p>Protoshield PCB</p> 	<p>Una “Protoshield” es una placa diseñada para facilitar la creación de prototipos. Permite hacer conexiones fáciles entre una placa de prueba y una placa Arduino.</p>
<p>2 x Micro servos</p> 	<p>Los servomotores tienen engranajes integrados y un eje controlable. Los servos permiten que el eje se posicione en varios ángulos, generalmente de 0 a 180 grados, y también permiten controlar la velocidad de giro. En este proyecto se han utilizado dos micro servos para permitir a la cámara termográfica un movimiento en el eje X y otro en el eje Y, que facilitará el barrido al hacer la termografía.</p>

<p>Logic level converter</p> 	<p>Para conectar un dispositivo de por ejemplo 3,3 V a una alimentación de 5 V se necesita un “logic level converter”. Este dispositivo tiene como función disminuir o aumentar una señal de alimentación para poder conectar un receptor que opera con un voltaje distinto. La importancia de usar este convertidor es que permite hacer el aumento o la disminución de señal en el mismo canal y de forma segura.</p>
<p>Sensor de temperatura</p> 	<p>El sensor de temperatura utilizado en este proyecto es el MLX90614ESF-DCI. Es un termómetro infrarrojo que mide temperaturas a distancia con el objeto a medir. Tiene un rango de funcionamiento de -20°C a 120°C.</p>
<p>PCB Board</p> 	<p>Una PCB board (Printed Circuit Board) es una placa que contiene un circuito impreso que conecta líneas y “pads” entre sí. El circuito está compuesto de soldaduras de metal que facilitan las conexiones eléctricas entre la superficie de la PCB y sus componentes electrónicos. Al ser un metal, la soldadura tiene una propiedad de adhesión mecánica muy fuerte. En el proyecto la PCB se ha utilizado para hacer la conexión entre el láser y la cámara termográfica.</p>
<p>Soportes para la rotación (X,Y)</p> 	<p>Estos soportes se han utilizado para montar la estructura de la cámara. Gracias a estas piezas, se puede colocar encima de ellas la cámara termográfica y el puntero laser. Al montarlos encima, se les permite hacer un movimiento a la cámara y al puntero para poder hacer tanto la calibración como la propia termografía de la zona u objeto a ensayar</p>

<p>Webcam Logitech c170</p> 	<p>La webcam se ha utilizado para poder tener una visión del objeto a ensayar. Gracias a ella, se puede ver dónde está el objeto y es una gran ayuda para poder calibrar la cámara termográfica mediante los puntos de calibración del programa</p>
---	---

Los esquemas del dispositivo se encuentran en el Anexo F. El montaje final del hardware es el siguiente (Ilustración 30):

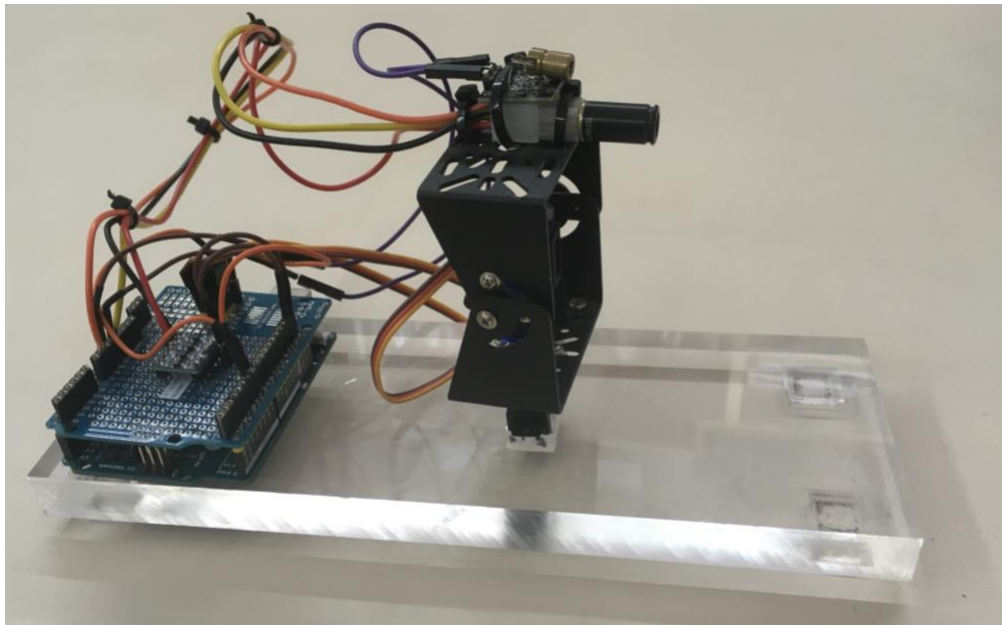


Ilustración 30 - Dispositivo de termografía

6.6. Software

Para implementar un correcto funcionamiento del sistema de termografía y una rápida y fácil interacción entre usuario y dispositivo, el programa diseñado sigue la secuencia lógica representada por el diagrama de flujo que se puede observar en la ilustración 31. El programa pertenece a George Rothern y Max Ritter y está implementado con Java. [15] En el Anexo G se puede encontrar el enlace para descargar el código completo.

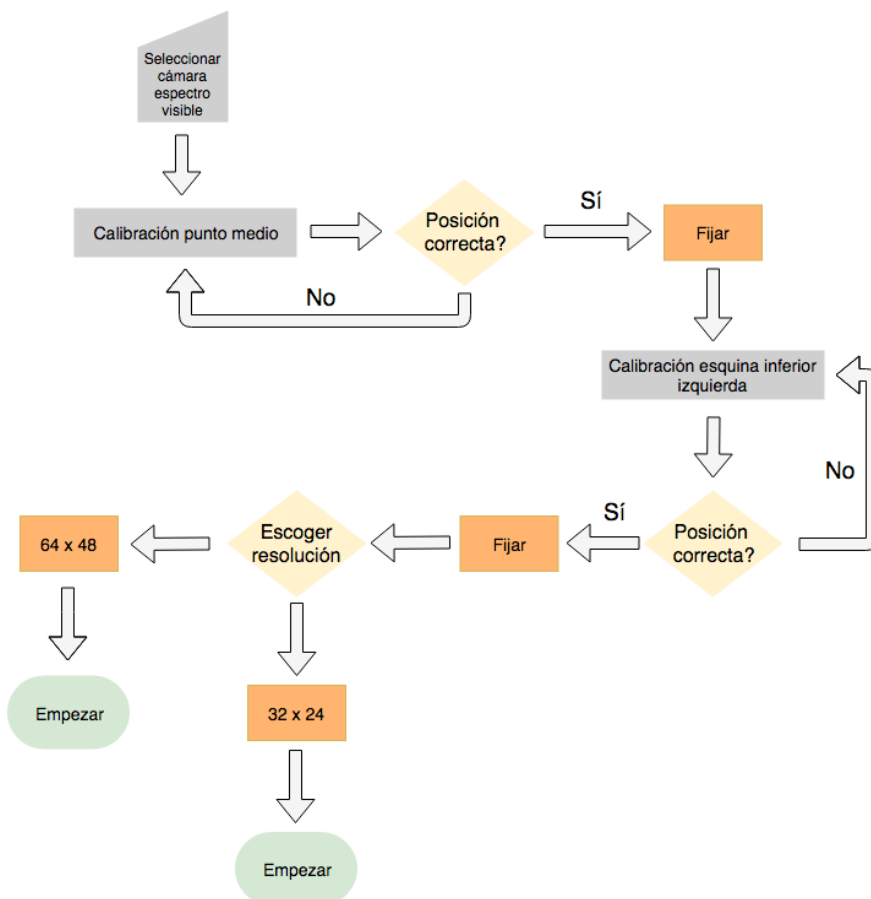


Ilustración 31 - Diagrama de flujo del sistema de termografía

El primer paso a realizar es seleccionar qué cámara se quiere utilizar como espectro visible. En este caso se ha utilizado una webcam conectada en un puerto COM (usb) que el programa ya reconoce directamente.

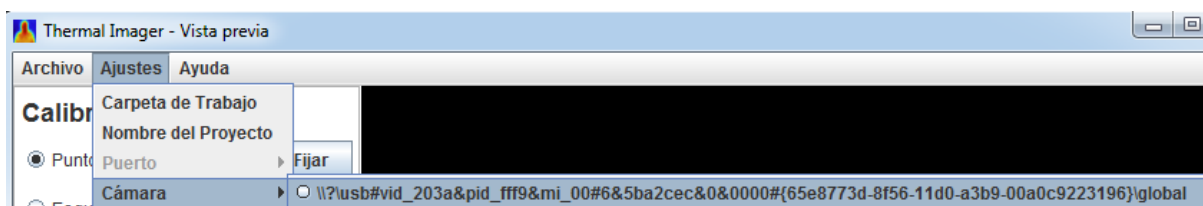


Ilustración 32 - Selección del puerto de la cámara

Una vez seleccionada, se procede a calibrar el punto medio. Éste es un punto amarillo que está situado en medio de la pantalla del espectro visible y mediante las flechas de calibración se tiene que alinear con el punto rojo del láser (visto a través de la cámara de espectro visible). Una vez alineados, se presiona el botón Fijar.

Al tener el punto medio fijado, se debe calibrar el punto de la esquina inferior izquierda de la imagen siguiendo el mismo procedimiento. Al tener los dos puntos fijados, se está determinando cuál es el encuadre de la termografía.

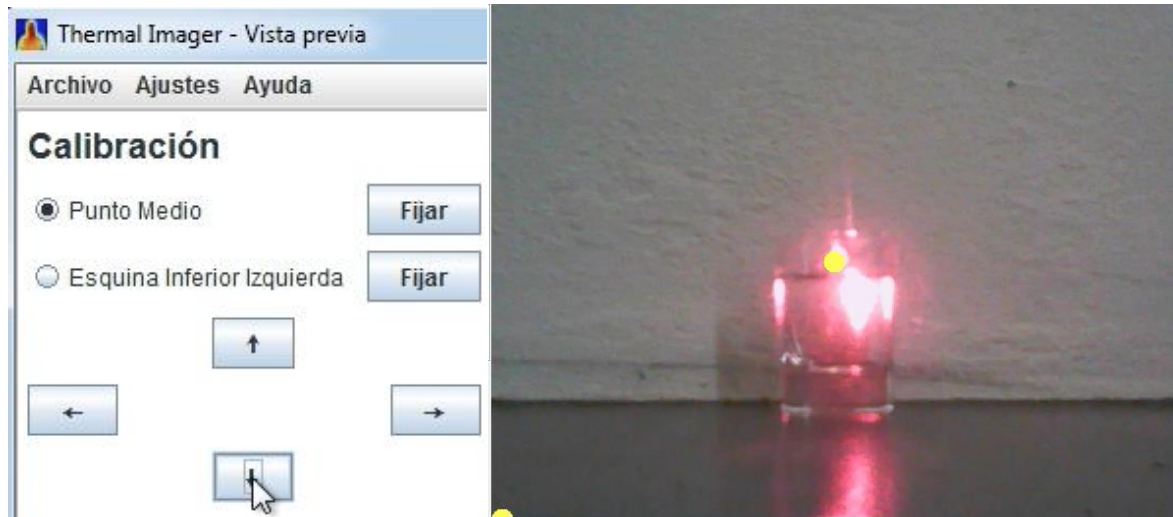


Ilustración 33 - Menú de calibración

Con los dos puntos fijados, solo quedará elegir qué resolución se quiere para el ensayo que puede ser de 64 x 48 (tiene una duración de más o menos 6 minutos y 45 segundos) o de 32 x 24 (tiene una duración de más o menos 1 minuto y medio) y pulsar el botón de empezar.

Resolución

☒ 64x48 (6¼ minutos)

☐ 32x24 (1½ minutos)

Empezar

Ilustración 34 - Menú de resolución

El siguiente y último paso es esperar a que la termografía se realice y seguidamente saldrán los resultados de la termografía.

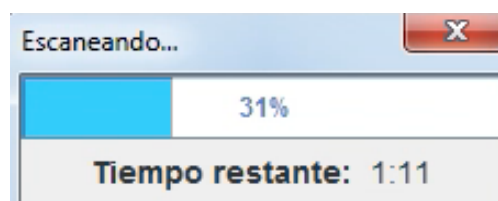


Ilustración 35 - Tiempo de escaneado

La interfaz completa del programa es la representada en la ilustración 36.

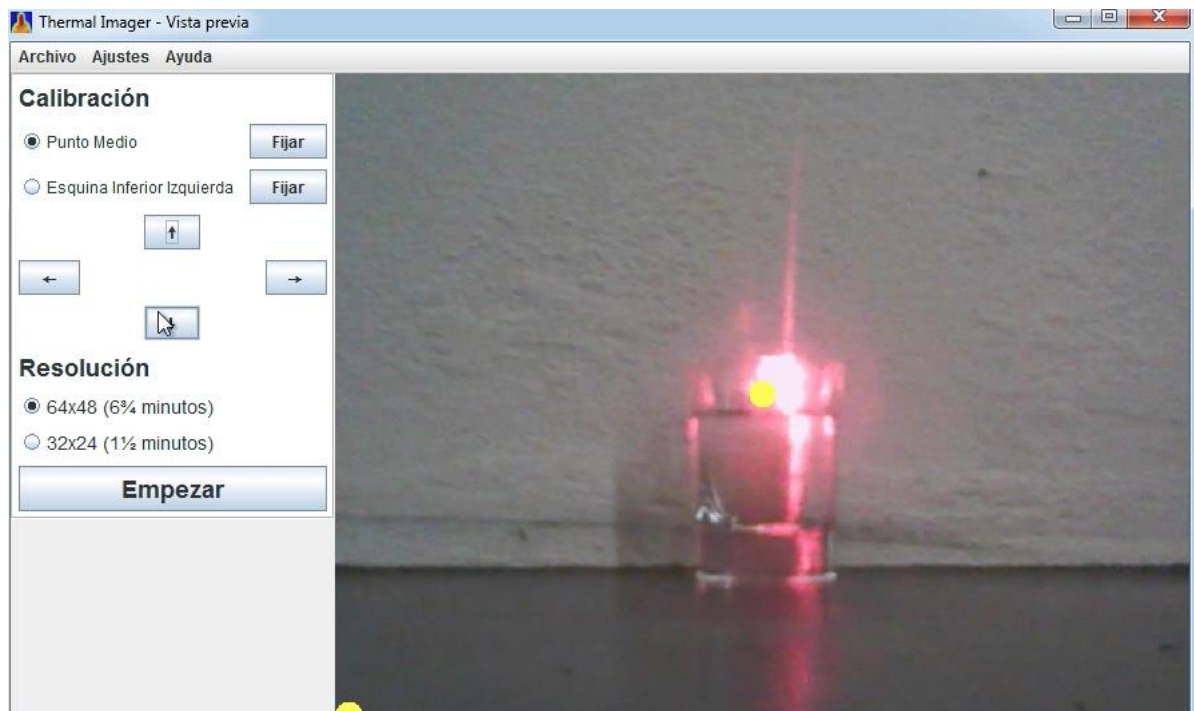


Ilustración 36 - Interfaz del programa de termografía

6.7. Resultados

En este ensayo se ha utilizado un vaso de agua caliente para poder ver el cambio de temperatura con el ambiente. En la ilustración 37 se puede apreciar el espectro termográfico del vaso de agua.

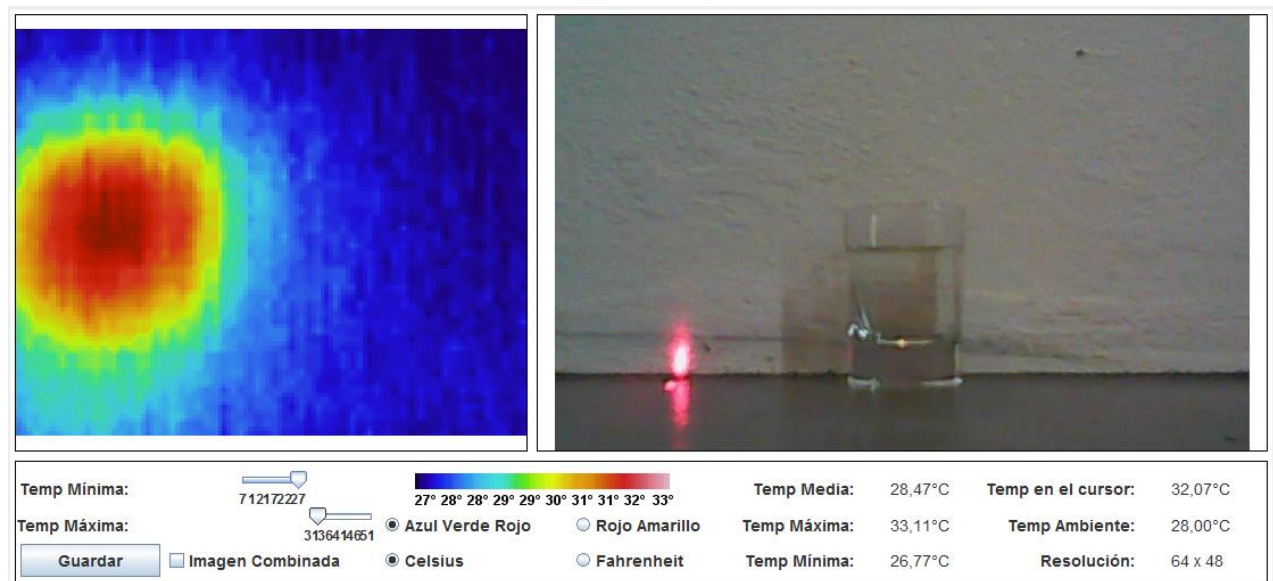
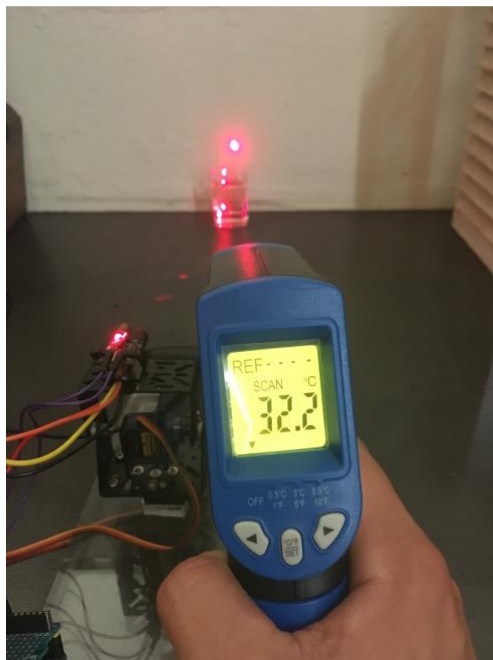


Ilustración 37 - Resultados termografía

En la ilustración 37 se puede ver el espectro termográfico del vaso de agua. Justo debajo hay una leyenda para referenciar las temperaturas que representan cada uno de los colores. Se puede regular la temperatura mínima y la máxima representada y los datos de la termografía se pueden expresar en grados Celsius o en Fahrenheit. El programa indica la temperatura media de la termografía, la temperatura máxima y la mínima del espectro, la temperatura ambiente y también indica la temperatura en el punto del cursor, pudiéndose éste mover por la termografía para saber la temperatura en un punto concreto.

Una vez hecha la termografía, se ha utilizado un detector térmico por infrarrojos (ilustración 38) para hacer una comparación con las temperaturas resultantes del dispositivo.



Temp en el cursor:	32,07°C
Temp Ambiente:	28,00°C
Resolución:	64 x 48

Ilustración 38 - Comparación de resultados de la termografía

7. Evaluación de líquidos penetrantes

7.1. Introducción

Para realizar la evaluación, se han utilizado unas muestras de soldadura de acero al carbono en miniatura de un kit educativo de END's [16]. Cada una de éstas muestras tiene una discontinuidad en la soldadura y se tendrá que hacer el ensayo para revelarla. También contiene una pequeña muestra de cada pieza, con la discontinuidad indicada y localizada como se puede ver en la ilustración 39:



Ilustración 39 - Discontinuidad por Líquidos Penetrantes

Cualquiera que sea el tipo de penetrante empleado, la indicación a que da lugar es consecuencia de una discontinuidad que aflora a la superficie del objeto y señala su situación, poniéndose de manifiesto por el contraste de color o fluorescencia sobre el fondo del revelador y por las cantidades de penetrante extraídas y retenidas en la capa del revelador.

El tamaño y el tipo de la discontinuidad no son fáciles de evaluar si el penetrante se difunde excesivamente en el revelador. Por tanto, una buena práctica que ayuda a la interpretación de las indicaciones es observar la superficie mientras se aplica el revelador para detectar cualquier indicación que tienda a dispersarse o extenderse demasiado, dando lugar a que aparezca difusa.

La interpretación final se hará después de que el penetrante haya podido ser extraído por el revelador durante el tiempo establecido en el procedimiento o en las instrucciones escritas de trabajo aplicables al ensayo. Si la superficie a examinar es demasiado extensa para completar su inspección en el tiempo previsto, la observación deberá efectuarse por zonas. El nivel de iluminación se determinará mediante un luxómetro² y será consignado como parámetro de ensayo.

Cualquier discontinuidad pasará desapercibida en un ensayo por líquidos penetrantes a menos que aflore en la superficie.

² Luxómetro: instrumento de medición que permite medir simple y rápidamente la iluminación real del ambiente.

7.2. Ensayo por líquidos penetrantes

El método de inspección por líquidos penetrantes es un ensayo no destructivo que sirve para detectar discontinuidades que afloren a la superficie de los materiales no porosos.

El ensayo consiste en aplicar un líquido sobre la superficie de la muestra, de tal manera que éste penetre, por fenómenos de capilaridad, en las discontinuidades.

Posteriormente se limpia el exceso de líquido de la superficie de la muestra, quedando únicamente el líquido atrapado en las discontinuidades, el cual señala las mismas y, previa aplicación de un revelador, puede ser observado en la superficie.

Para realizar el ensayo, se ha utilizado el procedimiento indicado según la Norma Europea EN ISO 3452-1:2013.

Etapas básicas del ensayo por líquidos penetrantes

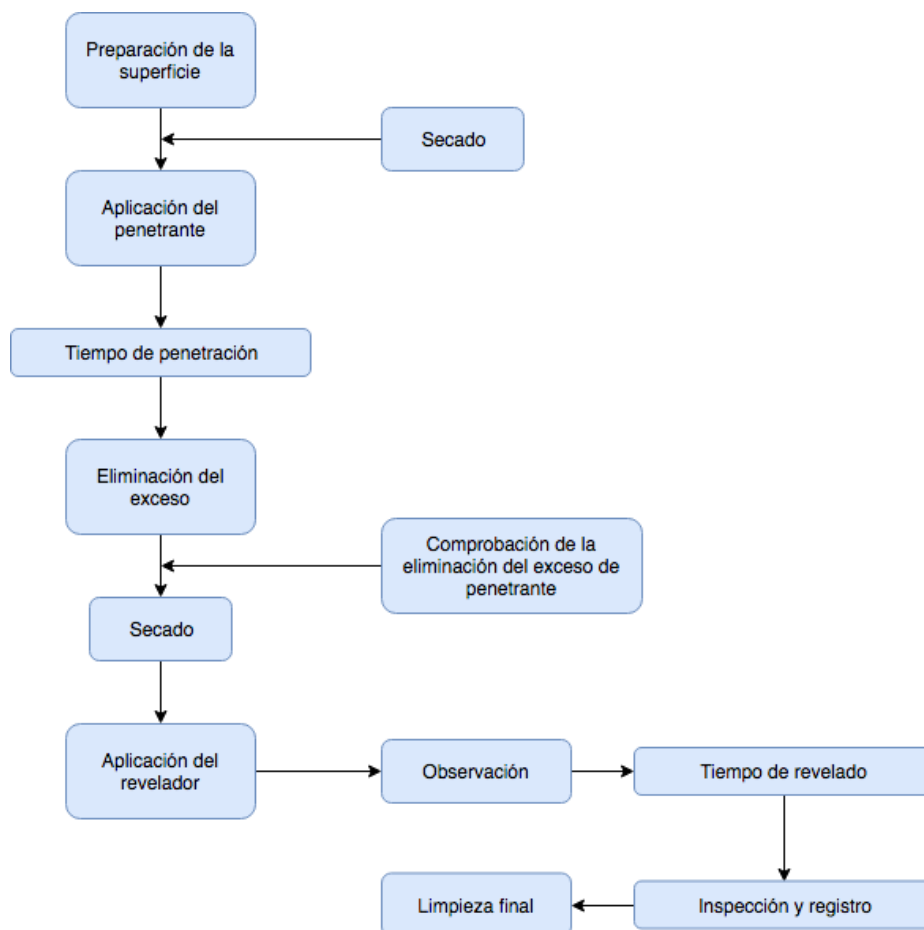


Ilustración 40 - Diagrama de proceso

Limpieza previa

Se ha utilizado disolvente para limpiar la pieza y posteriormente se ha secado para que no queden restos de agua ni de disolvente en las discontinuidades que pueda haber.



Ilustración 41 - Muestra limpiada y secada

Temperatura

Conforme indica la norma, la superficie del material donde se ha hecho el ensayo y la temperatura del ambiente deben estar entre 10 y 50°C.

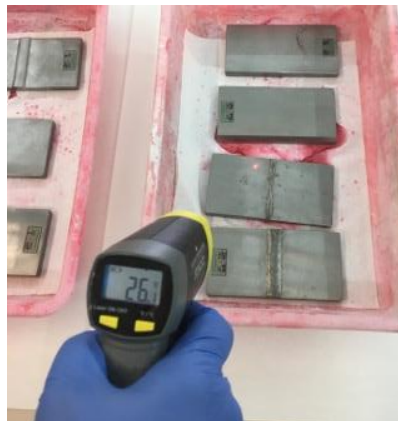


Ilustración 42 - Temperatura de la superficie a ensayar

Aplicación del penetrante

El penetrante se ha aplicado mediante un pincel. Una vez aplicado, se debe esperar entre 5 y 60 minutos a que el líquido pueda penetrar. El tiempo de penetración no tiene que ser menor al recomendado por el fabricante.

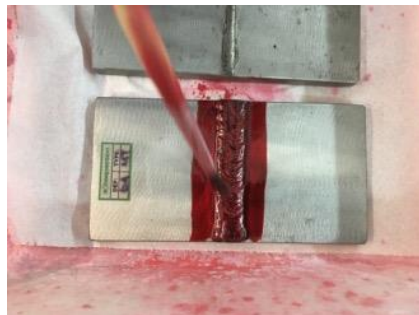


Ilustración 43 - Aplicación del líquido penetrante

Eliminación del exceso

Para eliminar el exceso de penetrante se debe usar un trozo de papel limpio. Después se ha utilizado otro papel humedecido con disolvente. Finalmente se realiza una inspección visual para que no haya restos de penetrante.

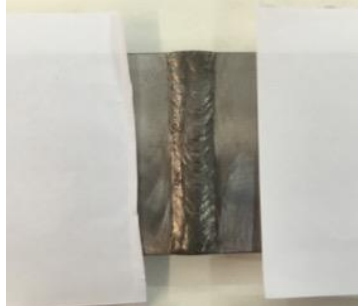


Ilustración 44 - Muestra con el exceso eliminado

Aplicación del revelador

El revelador se aplica uniformemente por pulverización. Para ver el resultado del revelador se tendrá que respetar el tiempo de espera de entre 10 y 30 minutos.



Ilustración 45 - Muestra con el revelador aplicado

Aspecto de las indicaciones

Después del revelado, pueden aparecer bastantes tipos de indicaciones distintas pero en esta evaluación, se han detectado dos tipos: indicaciones lineales continuas o indicaciones redondeadas.

· **Indicaciones lineales continuas:**

Son las indicaciones típicas procedentes de las grietas tales como grietas de fatiga, grietas de contracción, grietas de temple, grietas de corrosión bajo tensiones, etc. Pueden presentar ramificaciones. La indicación se catalogará como lineal cuando su anchura no sobrepase los 3 milímetros.



Ilustración 46 - Indicación lineal continua

· **Indicaciones redondeadas:**

Suelen aparecer en productos moldeados como consecuencia de rechupes o sopladuras internas más o menos grandes que afloran a la superficie a través de pequeñas aberturas. También pueden dar origen a este tipo de indicaciones los cráteres profundos que se forman en los extremos de algunas uniones soldadas. Estas indicaciones tienen como característica que su anchura debe ser de más de 3 milímetros.

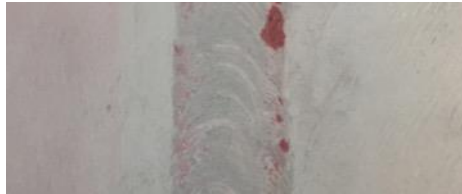


Ilustración 47 - Indicación redondeada

Limpieza final

Finalmente se limpian las muestras para poder volver a utilizarlas en otras ocasiones.



Ilustración 48 - Muestras limpiadas

7.3. Principios físicos

El ensayo por líquidos penetrantes se basa fundamentalmente en que un líquido tenga características como una capacidad humectante suficiente para mojar la superficie del material sólido que se desea inspeccionar y fluir sobre ella formando una película continua y uniforme, y un poder de penetración que le permita introducirse en las discontinuidades abiertas a la superficie y que normalmente no se aprecian a simple vista.

Esta capacidad de un líquido penetrante de poder fluir sobre una superficie de un sólido y penetrar en el interior de las discontinuidades abiertas en ella depende de las condiciones de la pieza a ensayar (estado de la limpieza de la superficie, configuración y tamaño de las discontinuidades) y de las propiedades físicas del líquido, principalmente de la tensión superficial y del poder humectante. No existe una característica física que, por sí sola, determine la calidad de un líquido penetrante.

Poder humectante

Si tenemos una gota de líquido sobre una superficie sólida, las fuerzas de cohesión y de adherencia determinan el ángulo de contacto " θ " formado por la superficie y la tangente a la superficie del líquido en el punto de intersección de ambas superficies líquido-sólido.

Se llama **mojabilidad (θ)** al ángulo que forma la tangente al menisco con la pared del recipiente por encima del líquido. [17]

- Si el ángulo θ es menor de 90° , el líquido moja la superficie y su poder humectante es bueno (imagen de la izquierda de la ilustración 43, por ejemplo, el agua).
- Si el ángulo θ es igual a 90° , el líquido no moja al sólido y su poder humectante es malo (imagen central de la ilustración 43).
- Si el ángulo θ es mayor de 90° , el líquido no moja al sólido y su poder humectante es muy malo, como por ejemplo el mercurio (imagen de la derecha de la ilustración 43).

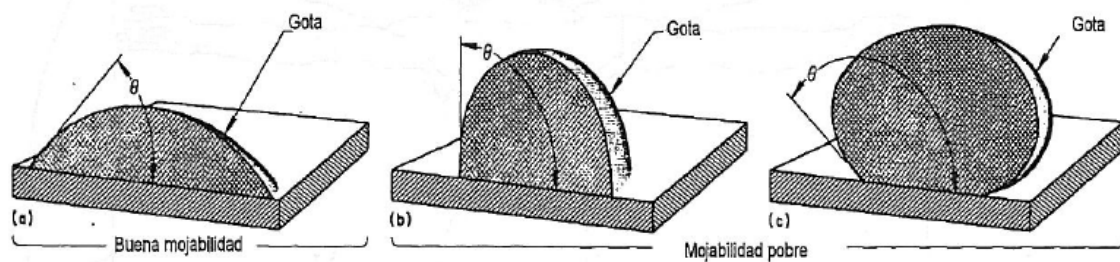


Ilustración 49 - mojabilidad de los líquidos [17]

Tensión superficial

La tensión superficial se puede definir como la fuerza por unidad de longitud que se ejerce tangencialmente sobre la superficie de separación entre un líquido y un gas.

La tensión superficial es la causa de la resistencia que ofrecen los líquidos a la rotura de la superficie.

La tensión superficial (T) se mide en Newtons/m (SI) y ésta disminuye al aumentar la temperatura. La tensión superficial se valora en un penetrante ya que los líquidos con una adecuada tensión superficial mejorarán el poder humectante, y por tanto, la penetración.

$$PODER\ HUMECTANTE = T \cdot \cos \theta$$

Ecuación 7 - Poder humectante

La consecuencia de la acción conjunta de las fuerzas de cohesión y las de adhesión es una fuerza de tensión distribuida a lo largo de la superficie de separación de un líquido y un gas, que se conoce como **tensión superficial**. [17]

Viscosidad y temperatura

En los líquidos hay una fuerza que se opone al deslizamiento mutuo de dos capas en contacto, esta fuerza recibe el nombre de **viscosidad**. El coeficiente de viscosidad η es característico de cada líquido y su unidad es el Poise. [17]

La viscosidad disminuye en los líquidos al aumentar la temperatura y no tiene influencia en la calificación de un penetrante, pero afecta a la velocidad de penetración.

Un penetrante de alta viscosidad necesitaría mucho tiempo de penetración y, una vez atrapado en la discontinuidad, tendría poca tendencia a salir. Un penetrante poco viscoso penetraría fácilmente pero tendría mayor tendencia a salir y es muy probable que se arrastre en el lavado. En consecuencia, un buen penetrante debe tener una viscosidad intermedia y debe estar a temperatura ambiente.

Capilaridad

El penetrante aplicado sobre la superficie de la pieza penetra al cabo de un tiempo en la discontinuidad por **capilaridad**. Después de eliminar el exceso de penetrante de la superficie, se aplica el revelador, que absorbe al penetrante que se introdujo en la discontinuidad, saliendo a la superficie por capilaridad y provocando una marca visual o indicación. Por tanto, la capilaridad interviene al entrar el penetrante en la discontinuidad y en la absorción del penetrante por el revelador.

La capilaridad de un penetrante se favorece con una tensión superficial baja, un ángulo de contacto pequeño y una viscosidad intermedia.

7.4. Ventajas y limitaciones

Ventajas	Limitaciones
<ul style="list-style-type: none"> · Es un método muy económico · Método sencillo de aplicar · La inspección se puede hacer a simple vista · El ensayo no afecta a la pieza · Rapidez en llevar a cabo el ensayo · Los resultados que se obtienen son inmediatos 	<ul style="list-style-type: none"> · Solo detecta fallas superficiales · Los inspectores deben tener una amplia experiencia · La superficie a inspeccionar debe estar limpia y no debe tener recubrimientos · No se puede inspeccionar materiales demasiado porosos ni con excesiva rugosidad · No proporciona un registro permanente de la indicación

Tabla 6 - Ventajas y limitaciones del ensayo por líquidos penetrantes

7.5. Aplicaciones

En el campo de aplicación se pueden hacer dos clasificaciones, en función del tipo de industria o en función del proceso de fabricación o mantenimiento.

Según el proceso de aplicación


- Moldeo o fundición
- Forja o estampación
- Laminación
- Extrusión
- Soldadura
- Mecanizado y rectificado
- Tratamientos térmicos
- Tratamientos químicos

Según el tipo de industria

- Industria aeronáutica: álabes, ejes de turbina, llantas, etc.
- Industria nuclear: depósitos y tuberías.
- Industria de automoción: válvulas, bielas, piñones, bloques, culatas, etc.
- Construcción: soldaduras de estructuras metálicas.
- Industria naval: cigüeñales, válvulas, dientes de engranaje, etc.
- Industria ferroviaria: ejes, ruedas, etc.

7.5. Hardware

La complejidad de ésta aplicación se ve reflejada en el software, ya que para el hardware de la evaluación sólo hace falta una cámara para poder hacer la toma de imágenes.

Componente	Función
<p>Webcam Logitech c170</p> 	<p>La webcam se ha utilizado para poder tener una visión del objeto a ensayar. Mediante ella se realiza la toma de imágenes para poderlas transferir al programa y así realizar la evaluación</p>

7.6. Software

Este software se ha realizado mediante el programa LabVIEW. Dentro del programa, se ha utilizado un toolkit llamado “Vision” que permite la obtención y el procesamiento de imágenes. A través de esta aplicación, se quiere llevar a cabo la evaluación de las indicaciones dadas en el ensayo por líquidos penetrantes. Como se ha comentado previamente, la función de este programa será identificar dos tipos distintos de indicaciones: lineales continuas o redondeadas.

Para entender el funcionamiento del software, se ha realizado este diagrama de flujos (ilustración 44) que muestra cómo funciona el programa. El código gráfico de LabVIEW se puede ver en el Anexo H.

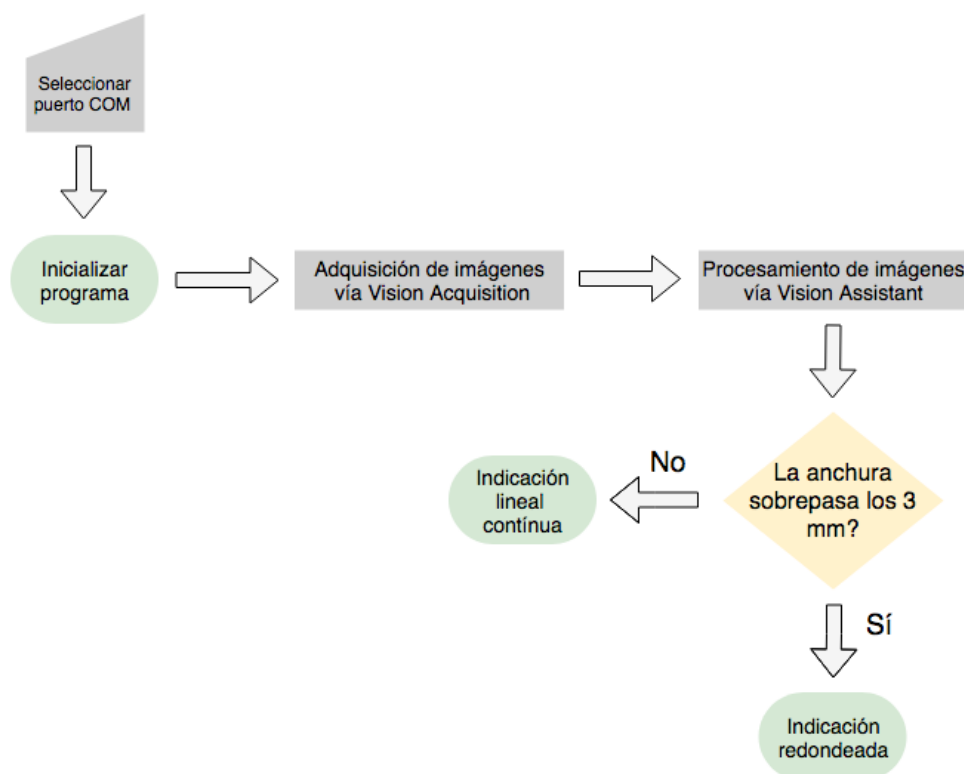
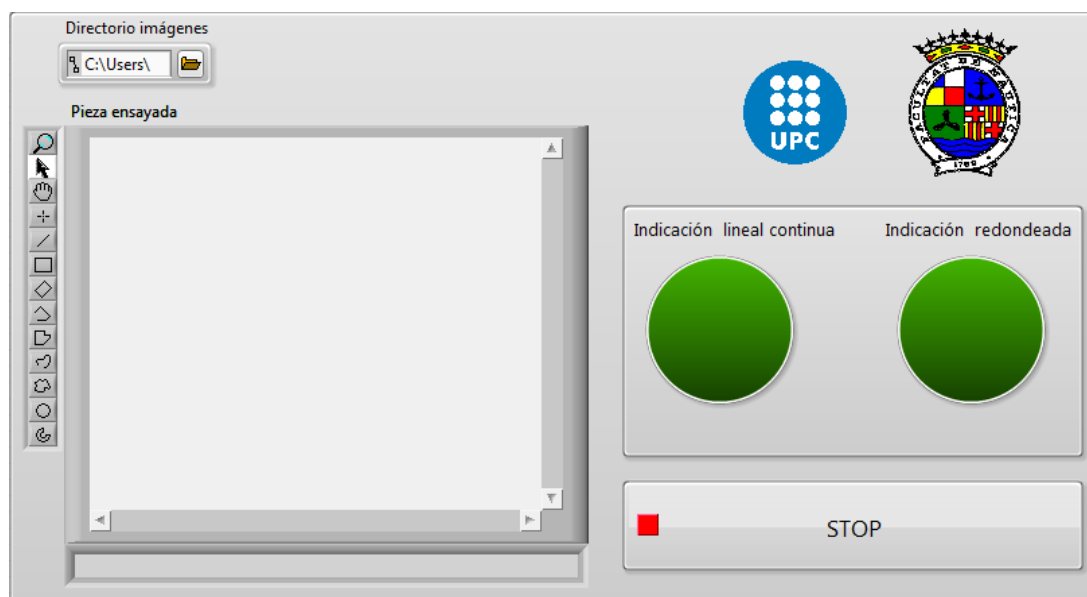


Ilustración 50 - Diagrama de flujo del software de evaluación

Antes de inicializar el programa se deberá definir el puerto COM donde está conectada la cámara. Una vez definido, se deberá inicializar el programa para que empiece a adquirir las imágenes, previamente tomadas por la cámara, mediante el “*Vision Acquisition*”. Estas imágenes, serán trasladadas al “*Vision Assistant*” mediante el cuál se detectará y se medirá la discontinuidad que haya en la muestra ensayada. Una vez medida, el “*Vision Assistant*” detectará la forma geométrica de la discontinuidad, y dará unos valores en centímetros que serán la longitud y la anchura de la discontinuidad. Mediante una función, se comparará la medida de la anchura con la longitud y el programa clasificará la indicación en lineal continua o en redondeada.

Interfaz del programa

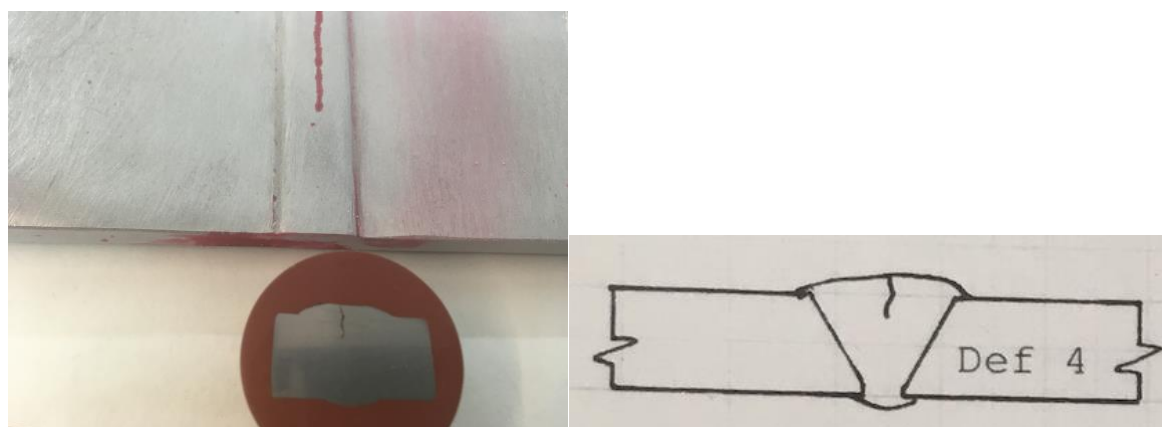


Il·lustració 51 - Interfaz del programa de evaluació

7.7. Resultados

Los resultados obtenidos en la evaluación son positivos, ya que coinciden con los resultados expuestos en el kit de educacional de líquidos penetrantes y partículas magnéticas [17]. Seguidamente se mostrará una comparativa entre los resultados obtenidos con los resultados representados en el kit [17].

Indicaciones lineales continuas



Il·lustració 52 - Indicación lineal continua 1

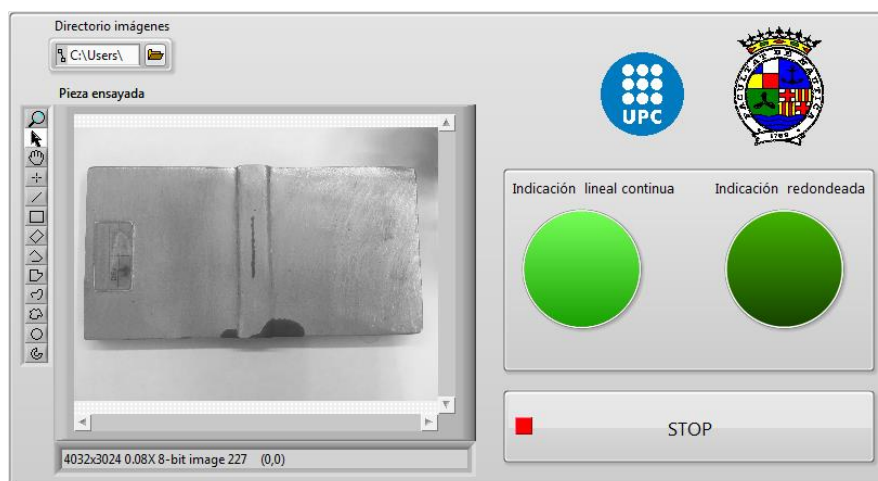


Ilustración 53 - Indicación lineal continua 1 detectada

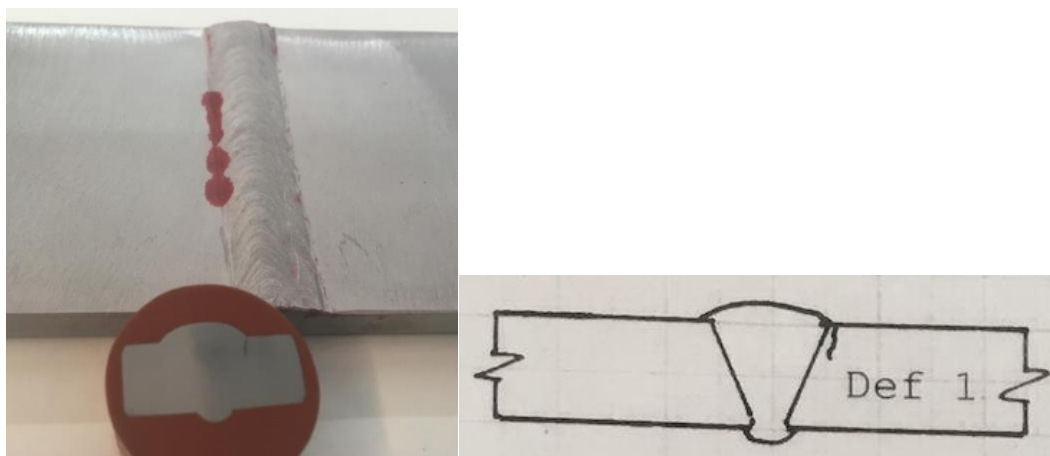
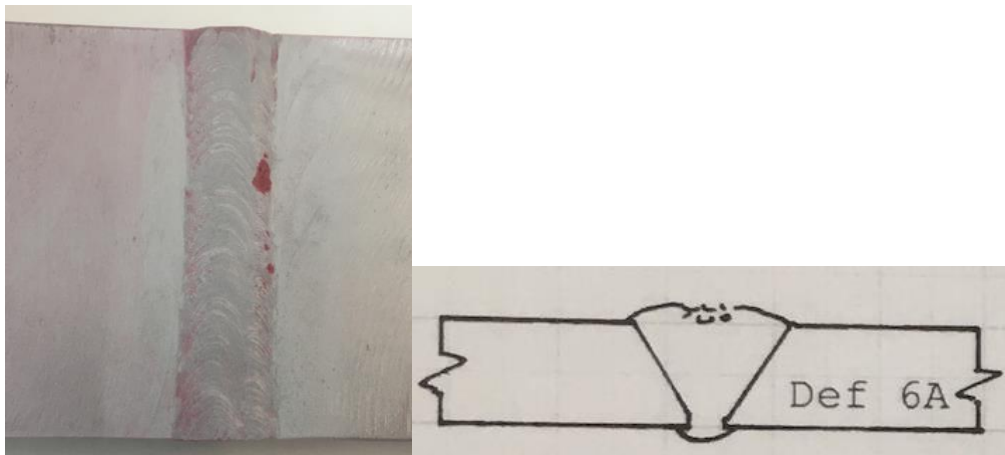


Ilustración 54 - Indicación lineal 2

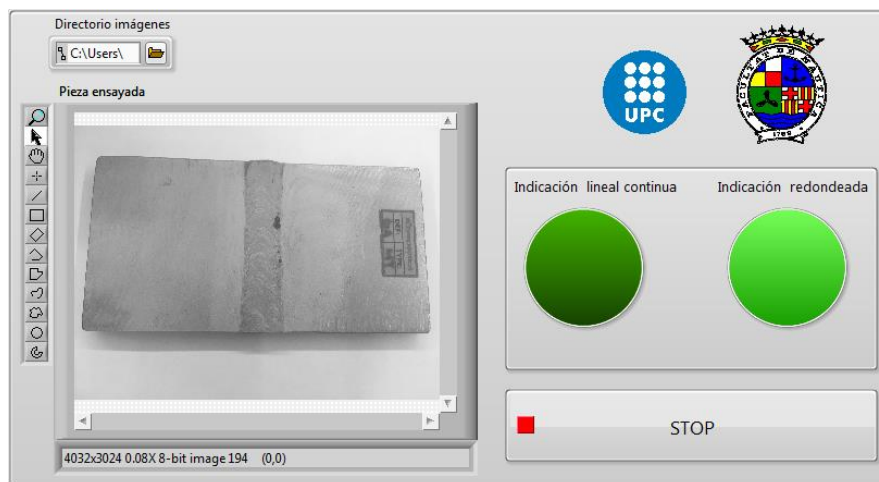


Ilustración 55 - Indicación lineal 2 detectada

Indicación redondeada



Il·lustració 56 - Indicación redondeada



Il·lustració 57 - Indicación redondeada detectada

En el Anexo I se encuentran más evaluaciones realizadas.

8. Presupuesto

Este capítulo detalla todos los costes involucrados a lo largo del desarrollo del proyecto por cada uno de los ensayos.

En las tablas que hay a continuación, enumeran todos los componentes de cada hardware y cada software con su coste.

Para los cables macho/macho sólo se venden en packs y el precio pagado por el pack de 40 unidades fue de 4,90 €, por lo que el precio aproximado de cada cable es de 0,13 €.

8.1. Ultrasonidos

Hardware

Componente	Coste (€)	Unidades	Total (€)
Arduino UNO	19,50	2	39
Protoboard	2,95	2	5,90
Sensor UT HC-SR04	5,75	2	11,50
Cables macho/macho	0,13	8	1,04
Total			57,44

Tabla 7 - Presupuesto hardware ultrasonidos

Software

Licencia	Coste (€)	Total (€)
NI LabVIEW	Licencia gratuita con identificación UPC	0
NI LabVIEW MakerHub	Licencia gratuita con identificación UPC	0
Total		0

Tabla 8 - Presupuesto software ultrasonidos

8.2. Sonda Hall

Hardware

El sensor de efecto Hall solo se vendía en pack de dos unidades y tenía un coste de 4,09 €. En este ensayo sólo se ha utilizado uno de ellos por lo tanto el precio aproximado del sensor es de 2,05€.

Componente	Coste (€)	Unidades	Total (€)
Arduino UNO	19,50	1	19,50
Protoboard	3,69	1	3,69
Sensor Efecto Hall	2,05	1	2,05
Cables macho/macho	0,13	3	0,39
Total			22,63

Tabla 9 - Presupuesto hardware sonda hall

Software

Licencia	Coste (€)	Total (€)
NI LabVIEW	Licencia gratuita con identificación UPC	0
NI LabVIEW VISA	Licencia gratuita con identificación UPC	0
Arduino 1.8.2	Licencia gratuita	0
Total		0

Tabla 10 - Presupuesto software sonda hall

8.3. Cámara termográfica

Los componentes para realizar el hardware de la cámara termográfica han sido proporcionados por el departamento de ensayos no destructivos, pero en este apartado se hace una estimación del coste que tienen todos los componentes.

Hardware

Componente	Coste (€)	Unidades	Total (€)
Arduino UNO	19,50	1	19,50
Protoshield PCB	4,51	1	4,51
Micro servos	7,69	2	15,38
Logic level converter	2,53	1	2,53
Sensor de temperatura	31,53	1	31,53
PCB board	1,92	1	1,92
Soportes rotación (x,y)	5,11	1	5,11
Webcam Logitech c170	17,99	1	17,99
Cables macho/macho	0,13	10	1,30
Total			99,77

Tabla 11 - Presupuesto hardware termografía

Software

Licencia	Coste (€)	Total (€)
Java	Licencia gratuita	0
Total		0

Tabla 12 - Presupuesto software termografía

8.4. Evaluación líquidos penetrantes

Hardware

Componente	Coste (€)	Unidades	Total (€)
Webcam Logitech c170	17,99	1	17,99
Total			17,99

Tabla 13 - Presupuesto hardware evaluación

Software

Licencia	Coste (€)	Total (€)
NI LabVIEW	Licencia gratuita con identificación UPC	0
NI LabVIEW VISION	Licencia gratuita con identificación UPC	0
Total		0

Tabla 14 - Presupuesto software evaluación

8.5. Presupuesto total

Ensayo	Coste (€)
Ultrasonidos	57,44
Sonda Hall	22,63
Termografía	99,77
Evaluación	17,99
Total	197,83

Tabla 15 - Presupuesto total del proyecto

9. Discusión y conclusiones

La discusión está constituida por el grado de cumplimiento de todos los objetivos y las posibles líneas futuras del proyecto, seguido de una conclusión.

Grado de cumplimiento de los objetivos

En cuanto al primer objetivo, “Definir los principios físicos de los ensayos no destructivos”, es un objetivo logrado, ya que es un objetivo teórico y no se han encontrado dificultades en la interpretación de ellos.

Hablando del objetivo B, “Seleccionar los sensores Arduino adecuados para cada ensayo”, ha dado resultados positivos ya que el ecosistema de Arduino es muy amplio y se ha podido encontrar un sensor perfecto para cada tipo de ensayo realizado.

Sobre el logro del tercer objetivo, “Diseñar y montar el hardware específico de cada ensayo”, se ha realizado exitosamente y los cuatro dispositivos se han podido llevar a cabo. Surgieron algunos problemas con las soldaduras del dispositivo de termografía que afectaban al contacto y al pin de tierra (GND) pero se pudieron solucionar.

Respecto al objetivo D, “Diseñar y programar el software de los dispositivos realizados”, ha sido la tarea más desafiante.

Empezando por el ensayo por ultrasonidos, es un objetivo logrado ya que se ha podido realizar la programación del software tal y como se había diseñado y funciona correctamente.

Seguidamente, en el ensayo por partículas magnéticas, se ha realizado una sonda Hall. El software de la sonda Hall se ha podido desarrollar, pero los resultados obtenidos no son fiables. La densidad de flujo recibida por el sensor durante el funcionamiento de la sonda Hall es de 25,48 mT pero al no poderse calibrar, ni comprobar los resultados con una sonda regulada por la UNE-EN ISO 9934-3:2003, no se pueden catalogar como correctos.

Sobre el ensayo por termografía, el software ha sido proporcionado por el tutor del trabajo pero tenía errores en algunas líneas del código como archivos que se encontraban en directorios erróneos o faltas de barras para cerrar alguna que otra línea código. Solucionando estos pequeños problemas, el código funciona correctamente y la cámara termográfica es un objetivo logrado.

Para finalizar, en el software realizado para la evaluación se han encontrado varias dificultades. El objetivo de esta evaluación era tener una cámara transfiriendo imágenes a tiempo real al programa, y éste procesar las imágenes al instante y obtener resultados de inmediato. Finalmente, no se ha conseguido este objetivo ya que la resolución de la cámara y el constante movimiento de ella, no permitía hacer las medidas pertinentes de cada discontinuidad. Por ello, se ha optado por realizar capturas de cada discontinuidad con otro dispositivo, almacenarlas en el ordenador y transferirlas una a una al programa para que pueda llevar a cabo la evaluación.

Líneas futuras

Dejando a un lado los dispositivos de ultrasonidos y termografía, el software de la sonda Hall y el de evaluación podrían desarrollarse más para remediar las debilidades existentes centrándose en los aspectos detallados a continuación.

En referencia a la sonda Hall, los resultados no son satisfactorios ya que, como se ha comentado en el apartado anterior, los datos recibidos por el sensor no son fiables ya que éste no se ha podido calibrar. Este inconveniente podría resolverse haciendo un estudio utilizando una sonda Hall homologada para medir el campo magnético en condiciones normales y durante un ensayo por partículas magnéticas, y hacer una comparación de los datos obtenidos, los que son fiables, con los que se obtienen con la sonda Hall diseñada en el proyecto. Una vez teniendo los datos de las dos fuentes distintas, como la relación entre el voltaje obtenido en la salida y la densidad de flujo magnético del sensor es lineal, se podría realizar una regresión lineal y operarla con los resultados del sensor Hall, para hacer una calibración y que los valores obtenidos de éste, sean satisfactorios.

Por otro lado, está el software de evaluación de líquidos penetrantes. Finalmente se ha desarrollado utilizando unas imágenes de los ensayos por líquidos penetrantes tomadas anteriormente. Estas imágenes se introducen al programa y se analizan para llevar a cabo la evaluación. Como el objetivo inicial era poder hacer la evaluación con la cámara transfiriendo las imágenes directamente, se podría hacer un estudio más profundo de la herramienta “*Vision*” de LabVIEW para poder evaluar las muestras directamente desde la cámara.

Conclusión

En resumen, los sistemas desarrollados a lo largo del proyecto logran demostrar que es posible hacer un paralelismo entre los ensayos no destructivos y las nuevas tecnologías como lo son Arduino y los lenguajes de programación. Los prototipos realizados funcionan como se espera, excepto el software de evaluación que no se ha podido realizar la evaluación “*in situ*” y la sonda Hall, que no se han podido obtener los medios para hacer una calibración y una comparación con valores reales. Por lo tanto, se concluye que vale la pena que los dispositivos continúen en desarrollo, ya que es muy innovador y prometedor.

11. Bibliografía y referencias

- [1] Don E. Bray and Roderic K. Stanley, *Nondestructive evaluation*, Texas: McGraw-Hill, Inc., 1989.
- [2] Arduino, «Arduino,» Arduino, 17 abril 2018. [En línea]. Available: <https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction>.
- [3] Oracle Corporation, «Java, Oracle,» Oracle, [En línea]. Available: https://www.java.com/es/download/faq/whatis_java.xml. [Último acceso: 28 junio 2018].
- [4] ISO standards online catalogue browser, «ISO,» [En línea]. Available: http://www.iso.org/iso/home/store/catalogue_ics.htm. [Último acceso: 19 junio 2018].
- [5] UNE standards online catalogue browser, «AENOR,» [En línea]. Available: <http://www.aenor.es/aenor/normas/ediciones/fichae.asp?codigo=8592#.WGeenFPhDIU>. [Último acceso: 13 abril 2018].
- [6] SEF, AEND, BINDT, COFREND y DGZIP, *Manual de estudio. Ensayo por ultrasonidos*, Cartagena, 2013.
- [7] Claudio Rimoldi, Luis Mariano Mundo, «Ensayo no destructivo por método de ultrasonido,» 2012. [En línea]. Available: <http://www.aero.ing.unlp.edu.ar/catedras/archivos/Apunte%20Ultrasonido%202012.pdf>. [Último acceso: 21 mayo 2018].
- [8] Universidad Industrial de Santander "Estructura y Propiedades de los Materiales", «Slideshare,» 3 Agosto 2012. [En línea]. Available: <https://es.slideshare.net/omarmo/ultrasonido-13865879>. [Último acceso: 18 junio 2018].
- [9] Arduino, «Arduino,» Arduino, 17 abril 2018. [En línea]. Available: <https://www.arduino.cc/en/Main/Products>.
- [10] Luis Llamas, «Luis Llamas,» Luis Llamas, [En línea]. Available: www.luisllamas.es. [Último acceso: 30 abril 2018].
- [11] SEF, AEND, BINDT, COFREND and DGZIP, «Manual de estudio PARTÍCULAS MAGNÉTICAS,» Cartagena, 2013.
- [12] Profesor Roberto Martín Murdocca, «Sensores de efecto Hall.,» San Luis.
- [13] Sensor Hall 49E, «Lluis Llamas,» [En línea]. Available: <https://www.luisllamas.es/medir-campos-magneticos-arduino-hall-49e/>. [Último acceso: 27 Junio 2018].
- [14] Daniel Auer, *Termografía, guía de bolsillo*, 2008.
- [15] George Rothern and Max Ritter, *Thermal Camera*, 2011.
- [16] Sonaspection International LTD, «NDE EDUCATIONAL KIT,» Sonaspection, L.A., 2009.

- [17] SEF, AEND, BINDT, COFREND y DGZIP, Manual de estudio. LÍQUIDOS PENETRANTES, 2a ed., Cartagena, 2013.
- [18] Francisco Ramírez Gómez, Introducción a los métodos de ensayos no destructivos de control de calidad de los materiales, Madrid: Instituto nacional de técnica aeroespacial, 1980.

Anexos

Anexos	62
Anexo A: Tabla comparativa de las placas Arduino	63
Anexo B: Esquemas del dispositivo de ultrasonidos	64
B.A Esquema Breadboard	64
B.B Esquema de conexión con Arduino	64
Anexo C: Código LabVIEW del dispositivo de ultrasonidos	65
C.A Programa principal	65
C.B Código de calibración.....	65
C.C Código de cálculo de distancia.....	66
C.D Código de parada	66
Anexo D: Esquemas de la sonda Hall	67
D.A Esquema Breadboard	67
D.B Esquema de conexión con Arduino	67
Anexo E: Código de la sonda Hall	68
E.A Código Arduino	68
E.B Código Labview	69
Anexo F: Esquemas del dispositivo de termografía	70
F.A Esquema Breadboard:	70
F.B Esquema de conexión con Arduino	70
Anexo G: Código del dispositivo de termografía	71
Anexo H: Código del programa de evaluación.....	72
Anexo I: Evaluaciones	73
I.A Indicación lineal continua	73
I.B Evaluación de la indicación lineal continua	73

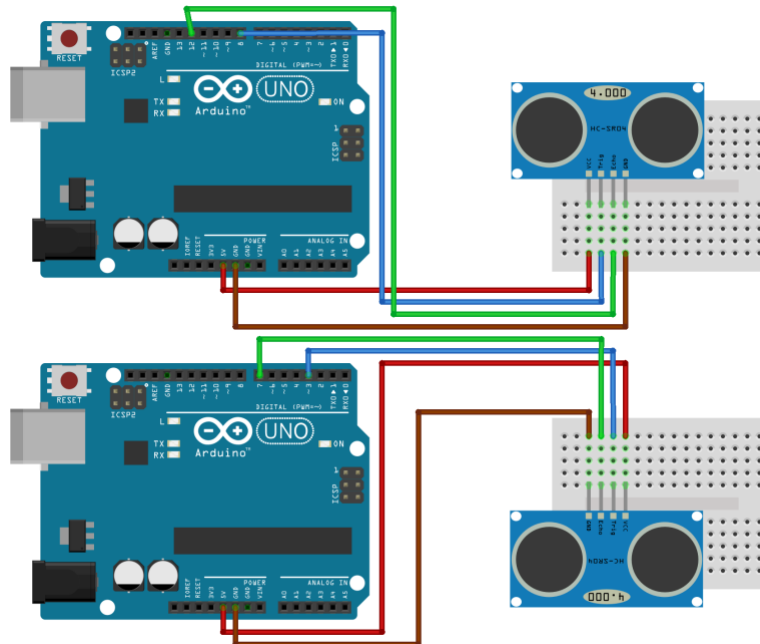
Anexo A: Tabla comparativa de las placas Arduino

Aunque se ha utilizado la placa Arduino UNO, hay muchos tipos de placas distintas en el mercado con especificaciones distintas. En la siguiente tabla se muestran los tipos de placas Arduino que se podrían utilizar en los dispositivos realizados y sus características.

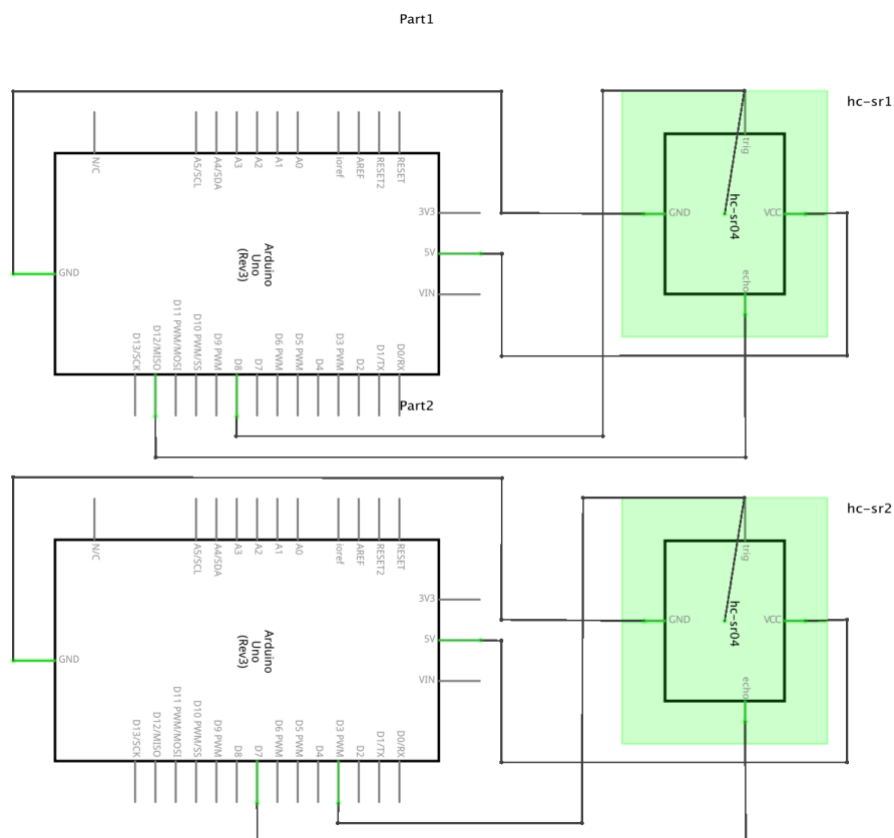
Nombre	Procesador	Voltaje de operación/ de entrada	Velocidad de la CPU	Entrada/Salida Analógica	IO/PWM Digital	EEPROM [kB]	SRAM [kB]	Flash [kB]	USB	UART
101	Intel® Curie	3.3 V/7-12 V	32 MHz	6/0	14/4	-	24	196	Regular	-
Gemma	ATTiny85	3.3 V/4-16 V	8 MHz	1/0	3/2	0.5	0.5	8	Micro	0
LilyPad	ATmega168V ATmega328P	2.7-5.5 V / 2.7-5.5 V	8 MHz	6/0	14/6	0.512	1	16	-	-
LilyPad SimpleSnap	ATmega328P	2.7-5.5 V / 2.7-5.5 V	8 MHz	4/0	9/4	1	2	32	-	-
LilyPad USB	ATmega32U4	3.3 V / 3.8- 5 V	8 MHz	4/0	9/4	1	2.5	32	Micro	-
Mega 2560	ATmega2560	5 V / 7-12 V	16 MHz	16/0	54/15	4	8	256	Regular	4
Micro	ATmega32U4	5 V / 7-12 V	16 MHz	12/0	20/7	1	2.5	32	Micro	1
MKR1000	SAMD21 Cortex-M0+	3.3 V / 5 V	48 MHz	7/1	8/4	-	32	256	Micro	1
Pro	ATmega168 ATmega328P	3.3 V / 3.35-12 V 5 V / 5-12 V	8 MHz 16 MHz	6/0	14/6	0.512 1	1 2	16 32	-	1
Pro Mini	ATmega328P	3.3 V / 3.35-12 V 5 V / 5-12 V	8 MHz 16 MHz	6/0	14/6	1	2	32	-	1
Uno	ATmega328P	5 V / 7-12 V	16 MHz	6/0	14/6	1	2	32	Regular	1
Zero	ATSAMD21G18	3.3 V / 7- 12 V	48 MHz	6/1	14/10	-	32	256	2 Micro	2
Due	ATSAM3X8E	3.3 V / 7- 12 V	84 MHz	12/2	54/12	-	96	512	2 Micro	4
Esplora	ATmega32U4	5 V / 7-12 V	16 MHz	-	-	1	2.5	32	Micro	-
Ethernet	ATmega328P	5 V / 7-12 V	16 MHz	6/0	14/4	1	2	32	Regular	-
Leonardo	ATmega32U4	5 V / 7-12 V	16 MHz	12/0	20/7	1	2.5	32	Micro	1
Mega ADK	ATmega2560	5 V / 7-12 V	16 MHz	16/0	54/15	4	8	256	Regular	4
Mini	ATmega328P	5 V / 7-9 V	16 MHz	8/0	14/6	1	2	32	-	-
Nano	ATmega168	5 V / 7-9 V	16 MHz	8/0	14/6	0.512	1	16	Mini	1

Anexo B: Esquemas del dispositivo de ultrasonidos

B.A Esquema Breadboard

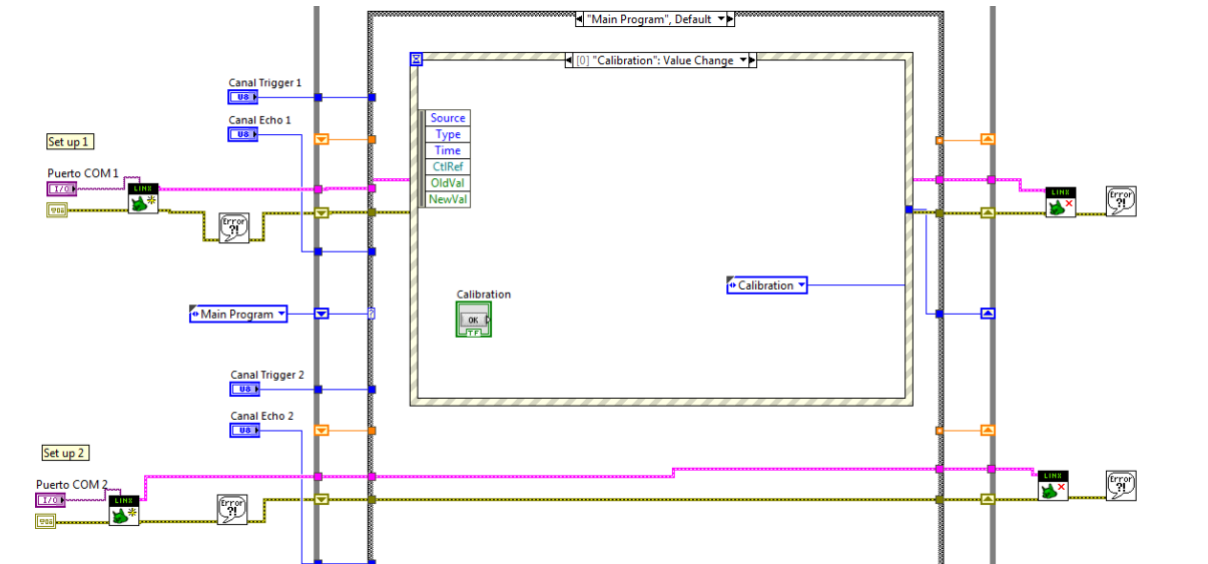


B.B Esquema de conexión con Arduino

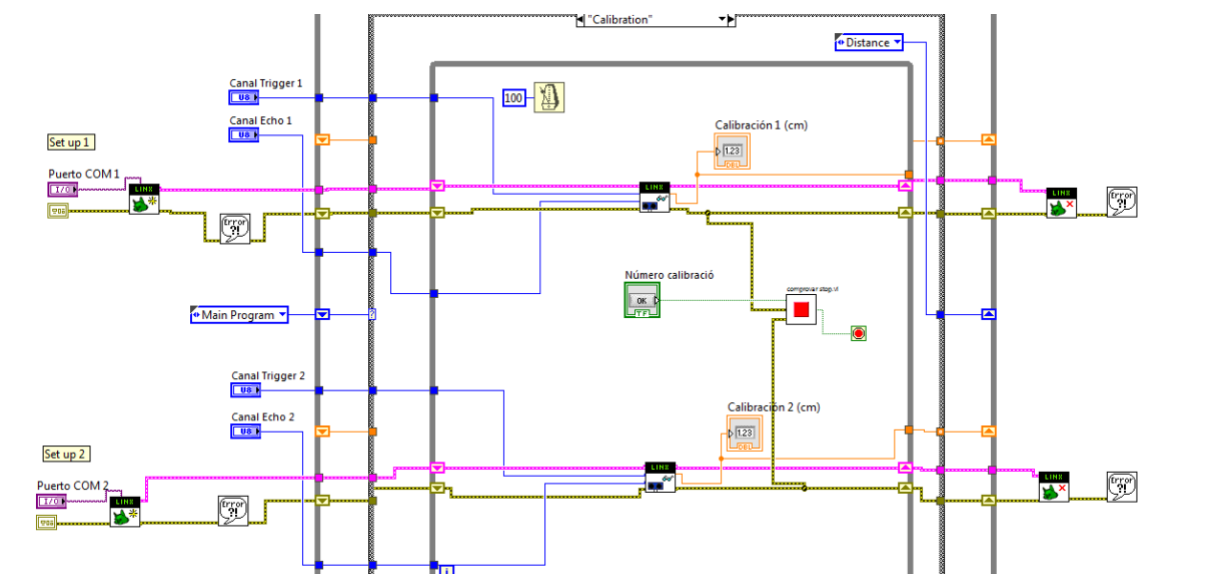


Anexo C: Código LabVIEW del dispositivo de ultrasonidos

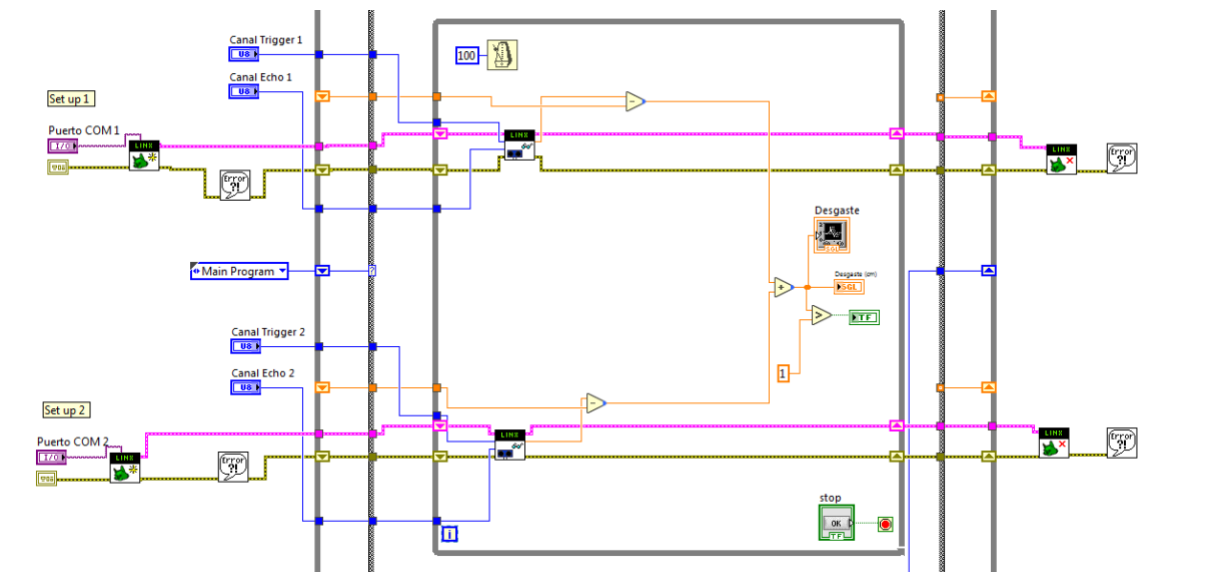
C.A Programa principal



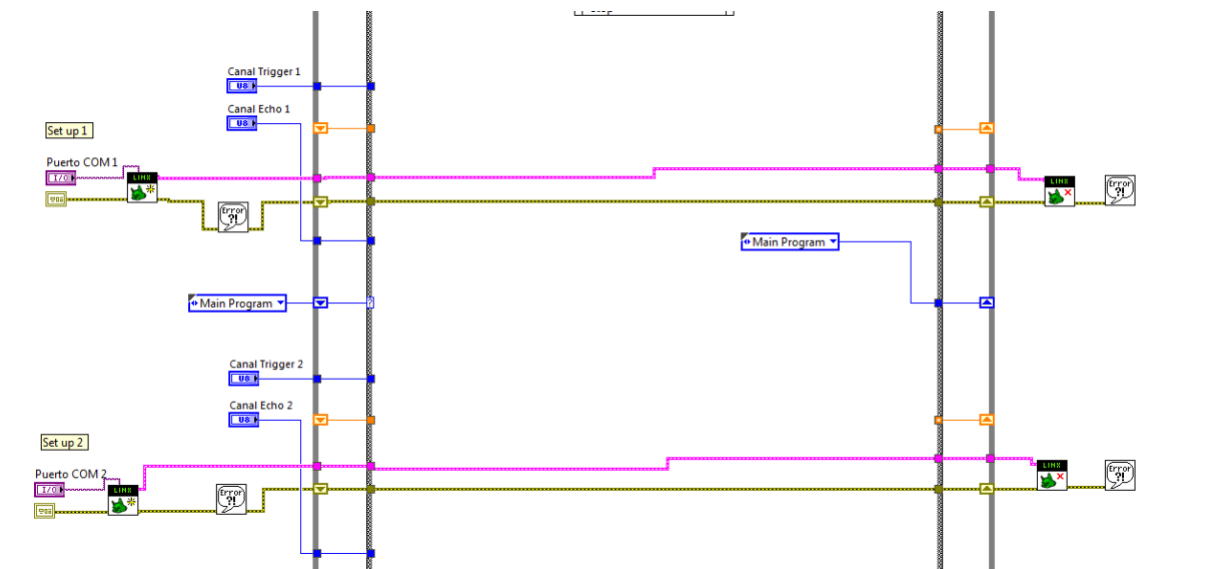
C.B Código de calibración



C.C Código de cálculo de distancia

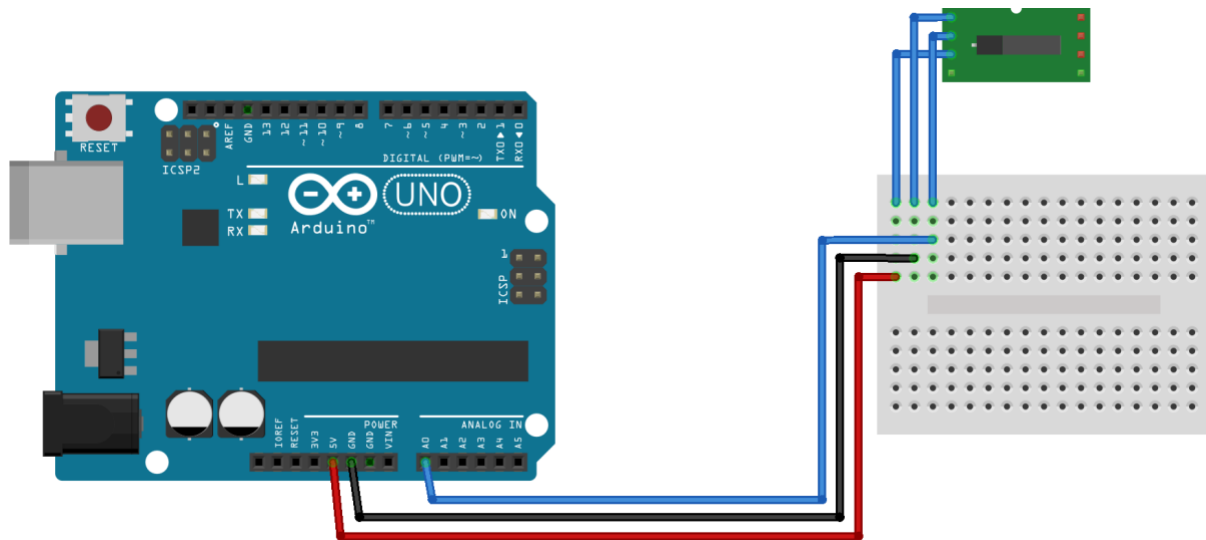


C.D Código de parada

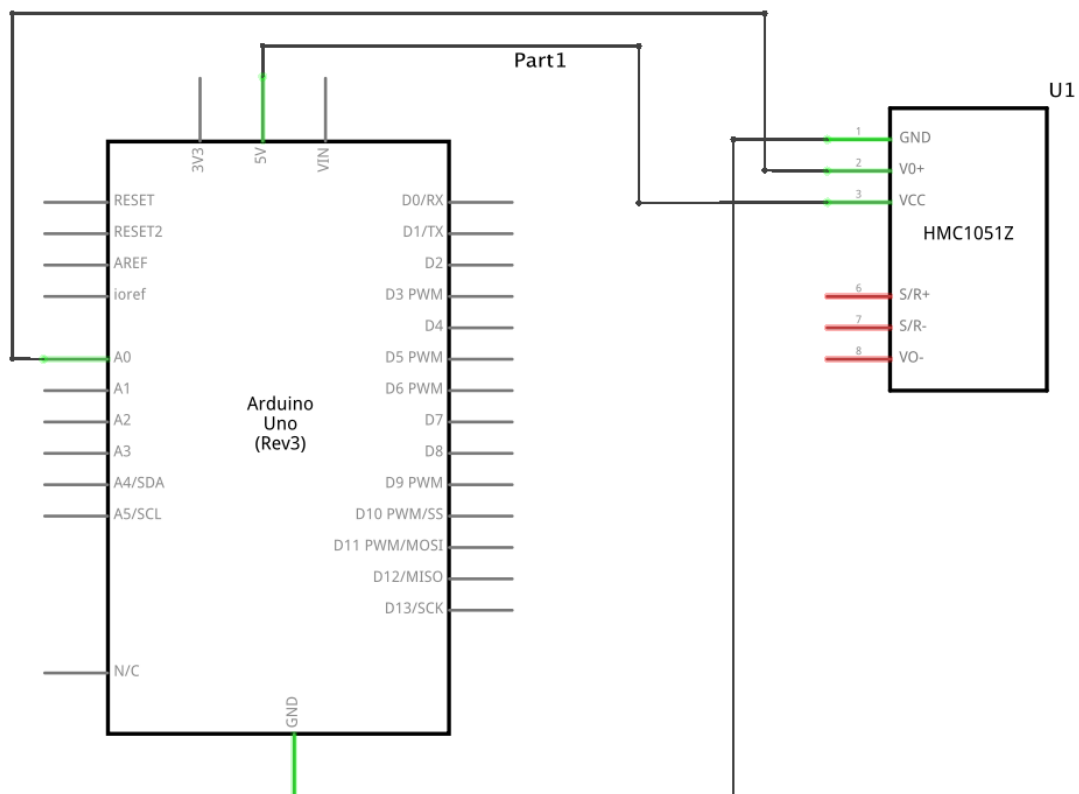


Anexo D: Esquemas de la sonda Hall

D.A Esquema Breadboard



D.B Esquema de conexión con Arduino



Anexo E: Código de la sonda Hall

E.A Código Arduino

```
const int pinHall = A0;

void setup() {
  pinMode(pinHall, INPUT);
  Serial.begin(9600);
}

void loop() {

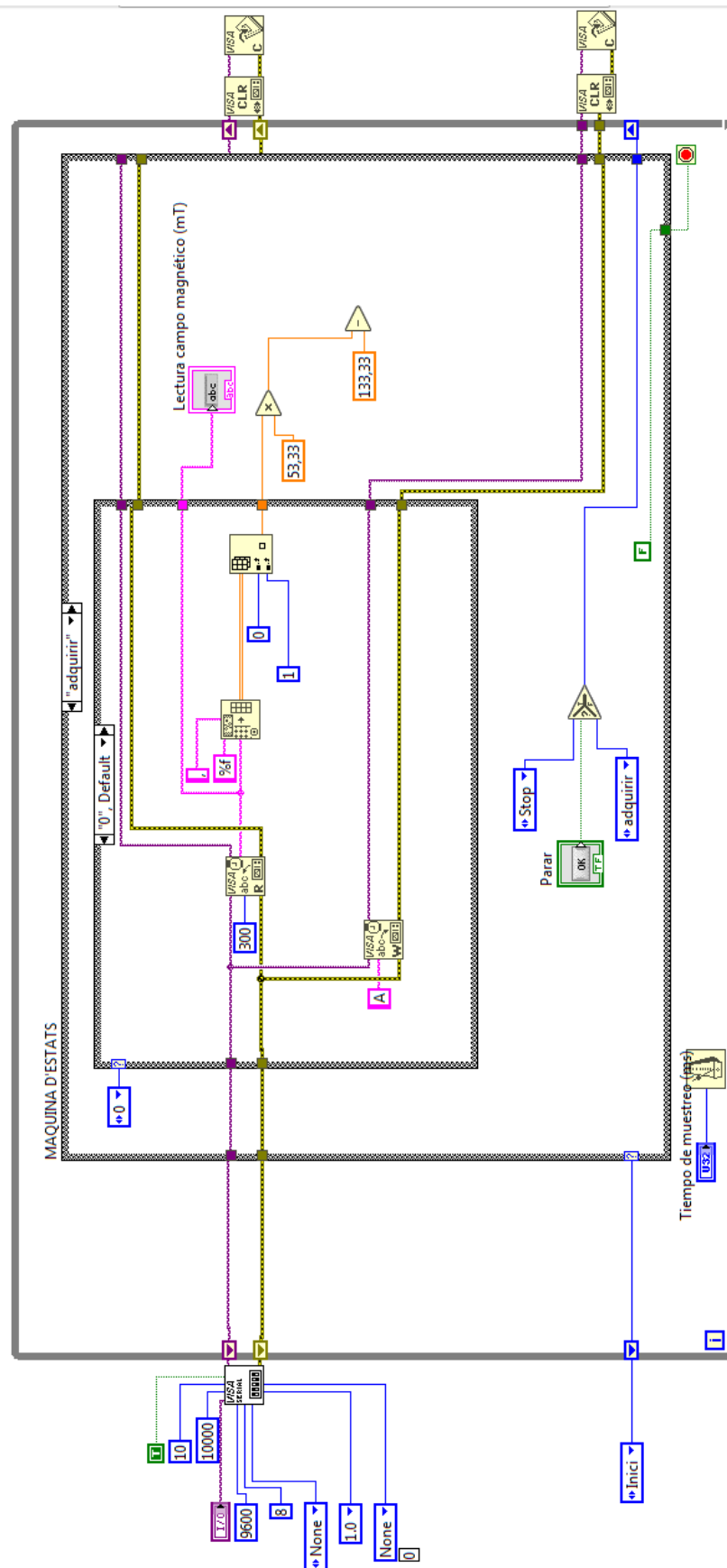
  //media de 10 medidas para filtrar ruido
  long measure = 0;
  for(int i = 0; i < 10; i++){
    int value =
      measure += analogRead(pinHall);
  }
  measure /= 10;

  //calculo del voltaje en mV
  float outputV = measure * 5000.0 / 1023;
  Serial.print("Voltaje de salida = ");
  Serial.print(outputV);
  Serial.println(" mV ");

  //interpolacion a densidad de flujo magnético
  float magneticFlux = (outputV * 53.33 - 133.3)/10000;
  Serial.print("Densidad de flujo magnetico = ");
  Serial.print(magneticFlux);
  Serial.print(" mT ");

  if(Serial.available())//obte bytes disponibles per lectura en el port serie( dades del buffer-->
  64 bytes max.)
  {
    char MODE = Serial.read();
  }
}
```

E.B Código Labview

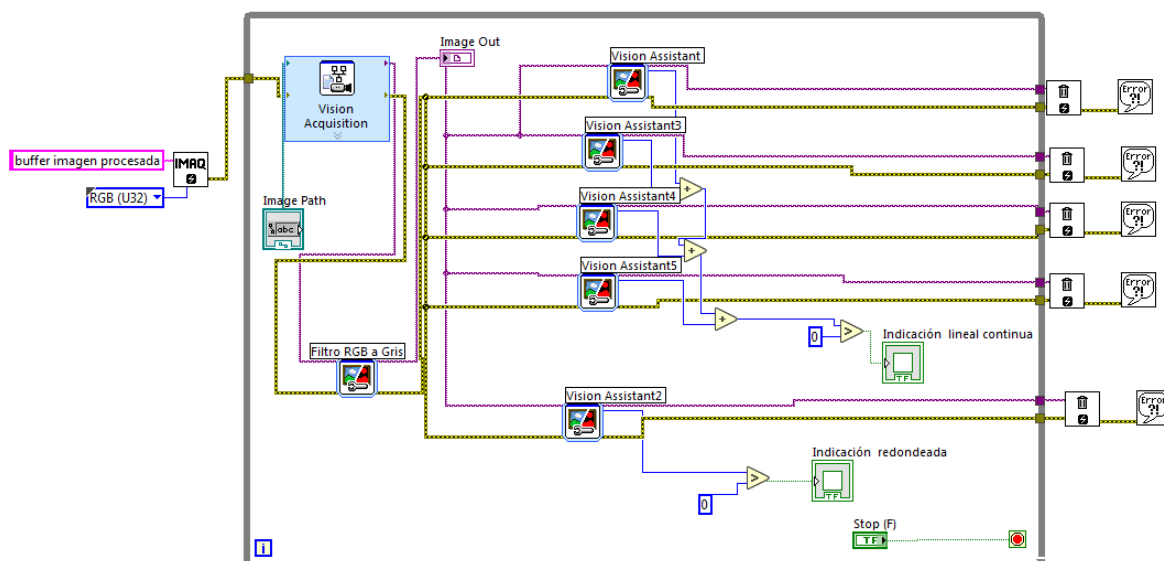


Anexo G: Código del dispositivo de termografía

Para descargar el código del dispositivo de termografía se debe utilizar la siguiente dirección:

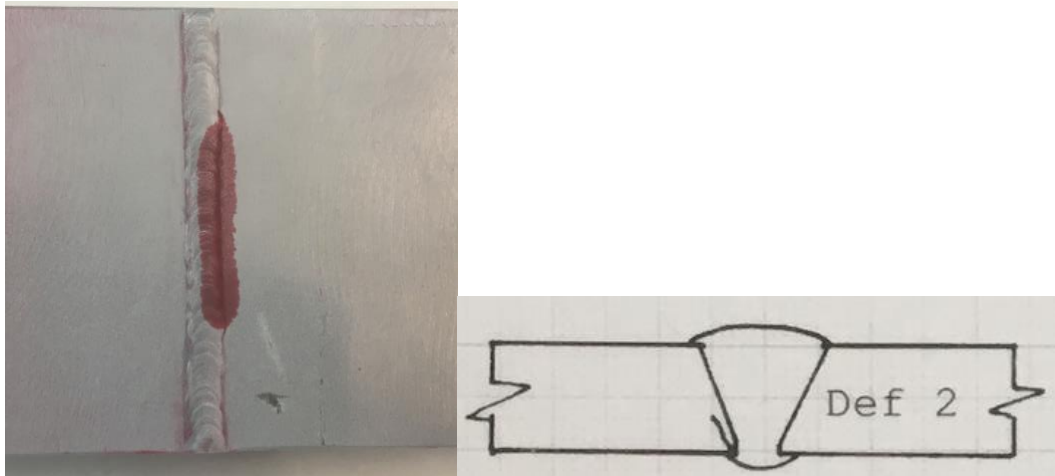
<http://www.centralnexus.com/thermal/ThermalCamera-2013.06.23.08.48.zip> [disponible el 25/04/2018].

Anexo H: Código del programa de evaluación



Anexo I: Evaluaciones

I.A Indicación lineal continua



I.B Evaluación de la indicación lineal continua

